

การใช้เศษแกรนิตทดแทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟูม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Use of granite waste as a fine aggregate replacement material in high strength
concrete with silica fume



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2021
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เศษแกรนิตทดแทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟูม
โดย	นายศุภากร อังกินันท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.กิม เหนือคลอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.กิม เหนือคลอง)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ)

ศุภากร อังกินันท์ : การใช้เศษแกรนิตทดแทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟูม. (Use of granite waste as a fine aggregate replacement material in high strength concrete with silica fume) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.กิม เหนือคลอง

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม งานด้านวิศวกรรมโยธาถือเป็นงานหลักที่สำคัญในการช่วยขับเคลื่อนความเจริญของประเทศในการพัฒนาและสรรค์สร้างระบบโครงสร้างพื้นฐานตั้งนั้นแล้วงานวิจัยและนวัตกรรมด้านวัสดุจะส่งผลในการส่งเสริมการเติบโตแบบก้าวกระโดดของประเทศ การศึกษาและวิจัยด้านคอนกรีตเพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมรวมทั้งการพัฒนาด้านวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ๆ จึงมีบทบาทความสำคัญอย่างมาก คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาที่ยาวนานตั้งแต่สมัยอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีความสะดวก ง่ายต่อการทำงาน และยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งในปัจจุบันยังมีการทดลองและวิจัยเพื่อศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตมาอย่างต่อเนื่อง

หินแกรนิตซึ่งได้จากการระเบิดภูเขา มักถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตก่อให้เกิดเศษหินแกรนิตที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ต้องเสียพื้นที่ในการกองเก็บทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากฝุ่น ดังนั้นเพื่อที่จะลดผลกระทบดังกล่าวแนวทางที่สามารถทำได้ คือ การนำเศษหินแกรนิตมาใช้แทนทรายธรรมชาติ การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตทั้งหมดเมื่อเทียบกับการใช้ทรายธรรมชาติร้อยละ 100 กำลังอัดจะลดลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เศษหินแกรนิตแทนทรายธรรมชาติในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงและใช้ซิลิกาฟูมมาปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตกำลังสูง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6272086221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD:

Supakorn Aungkinun : Use of granite waste as a fine aggregate replacement material in high strength concrete with silica fume. Advisor: Assoc. Prof. Sawekchai Tangaramvong, Ph.D. Co-advisor: Peem Nuaklong, Ph.D.

At the present time, the construction industry is expanding in line with economic and social growth. Civil engineering is one of the most important jobs in our country' progression of, development and infrastructural systems. Therefore, researches and innovations in materials construction will contribute the exponential growth of the country. Studies and researches about concrete are improved to reduce environmental problems as well as the development of new construction materials. In addition, they also play a very important role Furthermore, Concrete is a popular building material that has been used continuously for a long time from the past to the present. Due to its convenient usage and satisfied mechanical properties. Nowadays, there are ongoing experiments and researches to learn about concrete properties development of concrete

Granite, obtained by mountain explosion, is often used in construction industries. However, production procedures produce unusable granite fragments. Causing collection space wasting and environmental effect from remaining dust as a result, in order to mitigate these impacts, a viable approach to substitute granite waste from river sand is accepted replacing natural sand with granite fractions was performed. After new combination the best shown that the compressive strength

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบพระคุณ รศ. ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอกราบพระคุณ รศ. ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ผศ. ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ และอาจารย์ ดร. ภิรม เหนือคลอง ที่กรุณาแนะนำระเบียบวิธีการทำวิจัย ความถึงความรู้ต่างๆ ที่ใช้ประยุกต์ในการทำวิจัย รวมถึงคณาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอนทั้งในอดีตและปัจจุบัน

ที่สำคัญนี้ ขอกราบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจ รุนพี่และ รุนน้องทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนเทพศิลา ที่สนับสนุนวัสดุ (เศษหินแกรนิต) ที่ใช้ในงานวิจัย และบริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนสารผสมเพิ่มคอนกรีต Superplasticizer จำนวน 25 ลิตรมาใช้ในการทดสอบ

ศุภากร อังกินันท์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนงานการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.2 มวลรวม (Aggregate).....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.2.1 คอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกา.....	13
2.2.2 เศษหินแกรนิตและหินปูน.....	14
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	16

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	16
3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต.....	17
3.3 รายละเอียดการทดสอบ.....	18
3.4 การวิเคราะห์ผล	19
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการอภิปราย.....	20
4.1 ความสามารถในการทำงานได้.....	20
4.2 กำลังรับแรงอัด.....	21
4.3 กำลังดึงแยก	23
4.4 กำลังรับแรงดัด.....	25
4.5 โพรงและการดูดซึมน้ำ	27
4.6 ความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้	28
4.6.2 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ.....	31
4.6.3 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ.....	32
4.6.4 กำลังแรงอัดของคอนกรีตหลังเผาไฟ	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	36
5.1 สรุปผลการทดสอบ	36
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
ภาคผนวก	38
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัสดุ ⁽¹⁾	39
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบของคอนกรีต.....	43
ภาคผนวก ค รูปภาพประกอบงานวิจัย.....	57
บรรณานุกรม	60
ประวัติผู้เขียน	63

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แผนงานการวิจัย.....	4
ตารางที่ 2 ค่ากำลังทดสอบ Crushing strength และค่าความสึกกร่อน ของหินประเภทต่างๆ.....	6
ตารางที่ 3 แสดงค่า Apparent specific gravity ของมวลรวมชนิดต่าง ๆ.....	8
ตารางที่ 4 ประเภทของสารเคมีผสมเพิ่ม	11
ตารางที่ 5 รายละเอียดและลักษณะของการหลุดล่อนประเภทต่างๆ	13
ตารางที่ 6 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิต.....	16
ตารางที่ 7 คุณสมบัติของมวลรวมหยาบ	16
ตารางที่ 8 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ (kg/m^3).....	18
ตารางที่ 9 มาตรฐานที่ใช้ทดสอบและตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย	19
ตารางที่ 10 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 นาที ...	34

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 สภาพความชื้นในมวลรวม.....	9
รูปที่ 2 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้แทนทรายธรรมชาติตามมาตรฐาน ASTM C33.....	17
รูปที่ 3 ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต.....	20
รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน.....	22
รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน.....	23
รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 90 วัน.....	23
รูปที่ 7 กำลังดึงแยกของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน.....	24
รูปที่ 8 ร้อยละความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแยกและกำลังรับแรงอัด ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	25
รูปที่ 9 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	26
รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัด.....	27
รูปที่ 11 ร้อยละปริมาณโพรงของคอนกรีต.....	28
รูปที่ 12 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีต.....	28
รูปที่ 13 อุณหภูมิทดสอบสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834.....	29
รูปที่ 14 ตัวอย่างคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟที่เวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที.....	30
รูปที่ 15 สภาพคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟที่เวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที.....	30
รูปที่ 16 ผิวของคอนกรีตหลังจากการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที.....	31
รูปที่ 17 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 30 นาที.....	32
รูปที่ 18 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 60 นาที.....	32
รูปที่ 19 ร้อยละน้ำหนักที่คงค้างหลังการทดสอบเผาไฟ 30 นาที.....	33
รูปที่ 20 ร้อยละน้ำหนักที่คงค้างหลังการทดสอบเผาไฟ 60 นาที.....	33

รูปที่ 21 กำลังอัดคางของคอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 30 นาที.....35

รูปที่ 22 กำลังอัดคางของคอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 60 นาที.....35



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการก่อสร้างมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ โดยจะแสดงในรูปของโครงสร้างพื้นฐานและระบบสาธารณูปโภคเป็นหลัก งานด้านวิศวกรรมโยธาจึงถือเป็นงานหลักในการขับเคลื่อนกิจกรรมต่าง ๆ ดังนั้นงานวิจัยและนวัตกรรมด้านวัสดุจึงสำคัญและจะส่งเสริมการเจริญเติบโตแบบก้าวกระโดดของประเทศแต่ต้องคำนึงถึงปัจจัยของสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นประเทศที่มีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีจึงเน้นในงานวิจัยและนวัตกรรมใหม่ ๆ เป็นอย่างมาก เช่นเดียวกันการวิจัยด้านวัสดุทดแทนวัสดุธรรมชาติโดยใช้วัสดุรีไซเคิลมาทดแทน เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมพร้อมทั้งพัฒนาวัสดุชนิดเก่าให้ดีขึ้นและหาวัสดุในงานก่อสร้างชนิดใหม่ ๆ จึงมีบทบาทความสำคัญอย่างมาก คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมมากและใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานตั้งแต่สมัยอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งคอนกรีตมีความสะดวกและง่ายต่อการทำงานนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี โดยไม่ว่าจะเป็นงานคอนกรีตขนาดเล็กจนถึงงานคอนกรีตขนาดใหญ่

คอนกรีตกำลังสูงได้มีบทบาทในวงการก่อสร้างของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 เป็นผลมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วส่งผลให้ที่ดินมีราคาสูงขึ้นมากยิ่งในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ทำให้การใช้อาคารสูงมีความนิยมอย่างแพร่หลายมากขึ้นและใช้คอนกรีตกำลังสูงในการก่อสร้างของอาคาร ในต่างประเทศ

โดยเฉพาะในประเทศแถบยุโรป สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่นได้มีการศึกษาเรื่องคอนกรีตกำลังสูง มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 และใช้กันอย่างแพร่หลายในการสร้างอาคารสูง ตึกระฟ้า และอาคารขนาดใหญ่พิเศษ โดยส่วนผสมหลักในการผสมคอนกรีตคือ ปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ ยิ่งความนิยมในการใช้คอนกรีตกำลังสูงมากขึ้นทำให้ส่วนผสมต่าง ๆ ก็เป็นที่ต้องการมากขึ้นด้วย โดยปัจจุบันวิทยาการคอนกรีตกำลังสูงพัฒนาไปมาก มีการใช้สารเคมีในการลดน้ำเพื่อให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำลง มีการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตมวลรวมหยาบจากวัสดุหินแกรนิตของโรงโม่หินที่ใช้เป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีตและคอนกรีตกำลังสูงในอุตสาหกรรมก่อสร้างทำให้เกิดขยะจากวัสดุหินที่เหลือทิ้งซึ่งจะมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นส่วนผสมของคอนกรีตต่อไปได้นอกจากนั้นแล้วยังมีปริมาณขยะหินฝุ่นตกค้างเป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและยังต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบ นอกจากจะลดขยะได้แล้วยังลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตทรายเพื่อนำมาผสมคอนกรีตได้อีกด้วย ซึ่งกระบวนการผลิตทรายปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ 7,478.07 kgCO₂ eq แต่การนำเศษหินแกรนิตมาใช้แทนทรายธรรมชาติปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ 22.42 kgCO₂ eq การผลิตทรายธรรมชาติมาผสมคอนกรีตปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าทรายจากเศษหินแกรนิตมากถึง 333.5 เท่า(นันทน์ภัส อังกินันท์, ผู้ให้

สัมภาษณ์, 8 พฤษภาคม 2565) การพัฒนาวัสดุคอนกรีตกำลังสูงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้แล้วมาใช้แทนทรายจากธรรมชาติ

สำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตกำลังสูง ความทนทานและคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่และหาปริมาณซิลิกาฟูมที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีตกำลังสูง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตให้สามารถที่จะนำมาทดแทนการคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมละเอียดที่ผลิตจากมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่กับคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากมวลรวมทรายธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการทำงานได้ (Slump flow) และคุณสมบัติด้านความสามารถในการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงแยก โพรง การดูดซึมน้ำ และความทนไฟในคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟูม คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟูมที่ใช้ทรายจากเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของซิลิกาฟูมต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูง

1.2.3 เพื่อหาอัตราส่วนของปริมาณทรายแกรนิตและซิลิกาฟูมที่เหมาะสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก

1.3.2 เพิ่มซิลิกาฟูมร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์

1.3.3 ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงวันที่จะทดสอบ

1.3.4 ทดสอบการไหลแผ่ของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM-C1611 (2005)

1.3.5 ทดสอบหาค่ากำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกหน้าตัด 10 cm สูง 20 cm โดยบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 7 วัน 28 วัน และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM-C39 (2018)

1.3.6 ทดสอบหาค่ากำลังดึงแยก (Splitting tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM A (2011) โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดหน้าตัด 10 cm สูง 20 cm ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

1.3.7 ทดสอบหาค่ากำลังดัดของตัวอย่างคานขนาด 10x10x35 cm ตามมาตรฐาน ASTM-C1609 (2010) โดยบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน

1.3.8 ทดสอบหาปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำโดยใช้ตัวอย่างขนาด 10x10x10 cm ตามมาตรฐาน ASTM-C642 (2013)

1.3.9 ทดสอบความต้านทานของคอนกรีตภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834 (1999) โดยใช้ตัวอย่างเป็นทรงกระบอกขนาดหน้าตัด 10 cm สูง 20 cm และบ่มตัวอย่างที่อายุ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพื่อพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ทรายจากเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในงานคอนกรีตกำลังอัดสูง
- 1.4.2 เพื่อเสริมกำลังของคอนกรีตโดยใช้ซิลิกาฟวม
- 1.4.3 สามารถหาปริมาณการใช้ทรายแกรนิตและซิลิกาฟวมที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดตามความเหมาะสมของการใช้งาน

1.5 แผนงานการวิจัย

1. วางแผนการดำเนินงานและทบทวนวรรณกรรม
2. ออกแบบงานวิจัยและวิธีการทดสอบ
3. จัดทำรูปเล่มโครงร่างวิทยานิพนธ์
4. เตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการวิจัยในการทดสอบ
5. ผสมคอนกรีตและทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและความทนทาน
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ
7. สรุปผลการวิจัย
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1 แผนงานการวิจัย

ขั้นตอน	เดือน											
	ม.ค. 2564	ก.พ. 2562	มี.ค. 2562	เม.ย. 2562	พ.ค. 2562	มิ.ย. 2562	ก.ค. 2562	ส.ค. 2563	ก.ย. 2563	ต.ค. 2563	พ.ย. 2563	ธ.ค. 2563
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												



บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 คอนกรีตกำลังสูง (High-Strength Concrete)

คอนกรีตกำลังสูงเป็นที่รู้จักตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 โดยกำหนดว่าถ้ากำลังรับแรงอัดเกิน 34 MPa ถือว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูงหลังปี 1960 จึงมีการพัฒนากำลังอยู่ในช่วง 41 – 50 MPa ในปัจจุบันกำหนดไว้ที่ 55 MPa เพื่อใช้ในการก่อสร้างอาคารสูง คอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตในประเทศจะใช้การลดน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตให้เหลืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประมาณ 0.28 - 0.36 โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อให้ความสามารถในการทำงานได้สูง (Super-plasticizer) และผสมซิลิกา ฟุม (Silica Fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะด้วยปฏิกิริยาทางเคมีของซิลิกาเพิ่มอีกทาง **ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดดีขึ้น** คอนกรีตที่ผลิตด้วยกระบวนการนี้ นอกจากจะได้คอนกรีตที่กำลังสูงแล้วยังให้ความสามารถในการทำงานได้สูงอีกด้วย

2.1.2 มวลรวม (Aggregate)

2.1.2.1 ประเภทของมวลรวม

การแบ่งประเภทของมวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตสามารถแบ่งตามขนาดได้ดังนี้

1. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) ได้แก่ หินกรวด, หินหรือหินปูนที่มีขนาดตั้งแต่ 4.75 มิลลิเมตรขึ้นไปหรือไม่สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ กรวด หินย่อย หรือหินโม

2. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ได้แก่ มวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือสามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือต้องไม่ผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200

2.1.2.2 คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ราคา และสัดส่วนการผสม มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ต้องแข็งแรง ทนทาน มีเหลี่ยมมีคม ไม่ขยายตัวมาก ที่สำคัญต้องสะอาดและมีสารหรือสิ่งแปลกปลอมที่ทำให้คอนกรีตด้อยคุณภาพน้อยที่สุด โดยมีขนาดคล้อยอยู่ในปริมาณที่มาตรฐานกำหนด สิ่งต่าง ๆ ดังกล่าวจะส่งผลให้คอนกรีตออกมามีคุณภาพสูง ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่มวลรวมต้องมีคือ

1. ความแข็งแรง (Strength) จากการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักกดอัดของมวลรวมโดยวิธี Crushing value test พบว่ากำลังรับแรงอัดของมวลรวมอยู่ในช่วง 80 – 500

MPa มีค่าเฉลี่ยที่ได้อยู่ที่ 200 MPa และมวลรวมต้องมีความสามารถในการรับน้ำหนักอัดไม่น้อยกว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 2.1

2. ความทนทานต่อแรงกระแทกและการสึกกร่อน (Impact and Abrasion resistance) เป็นตัวแสดงถึงคุณภาพของหินที่นำมาผสมคอนกรีต หินที่คุณภาพดีเหมาะแก่การใช้งาน ต้องทนทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสีสูง ๆ ได้ ซึ่งสามารถหาค่าการสึกกร่อนจากการทดสอบ ลอสแอนเจลลิส (Los Angeles test) ตามมาตรฐาน ASTM-C131 (2014) ซึ่งผลการทดสอบได้แสดง ในตาราง 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังทดสอบ Crushing strength และค่าความสึกกร่อน ของหินประเภทต่างๆ

Rock group	Crushing strength (MPa)	Abrasion value (%)
Basalt	200	17.6
Flint	205	19.2
Gabbro	195	18.7
Granite	185	18.7
Gritstone	220	18.1
Hornfels	340	18.8
Limestone	165	16.5
Prophyry	230	19.0
Quartzite	330	18.9
Schist	245	18.7

ที่มา: Neville (2011)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. ความคงตัวทางเคมี (Chemical stability) มวลรวมต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี กับปูนซีเมนต์หรือ กับสิ่งแวดล้อมภายนอก มวลรวมในบางสถานการณ์มีสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับด่าง (Alkalis) ผสมอยู่ในเนื้อหินเมื่อมาทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ เกิดเป็นลักษณะร่วน และขยายตัวทำให้เกิดรอยแตกร้าวทั่วไปในคอนกรีต เรียกว่าปฏิกิริยา Alkalis – Aggregate Reaction (Knettsch, Wang, Snaar-Jagalska, & Heimovaara-Dijkstra) ในกรณีที่ต้องใช้มวลรวมดังกล่าวจะต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความเป็นด่างที่ต่ำ (Low-alkali cement)

4. ลักษณะรูปร่างและลักษณะผิว (Particle shape and Surface texture) ลักษณะรูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งคอนกรีตสด (คอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัว) หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วแต่จะส่งผลในคอนกรีตสดมากกว่าในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว คอนกรีตที่ใช้มวลรวมลักษณะเหลี่ยมคมจะมีความสามารถในการทำงานได้ (

Workability) ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมลักษณะกลมเนื่องจากรูปทรงเหลี่ยมคมมีลักษณะของการยึดขวางที่ดีส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวสูง ส่วนลักษณะผิวของมวลรวมจะส่งผลโดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยว ยิ่งผิวหยาบหรือมีรูพรุนมากจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวสูงส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ต่ำ ดังนั้นแล้ว ในการเลือกรูปทรงและพื้นผิวของมวลรวมจะต้องมีการผสมระหว่างมวลรวมที่มีผิวหยาบด้านและผิวละเอียดเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับเนื้อซีเมนต์

5. ขนาดคละหรือการกระจายตัวของมวลรวม (Aggregate Grading) มวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องมีการกระจายตัวของขนาดต่าง ๆ ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งจะช่วยให้มวลรวมเรียงตัวกันได้แน่นขึ้นและลดปริมาณช่องว่างน้อยลง ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ ช่วยลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ลงที่ระดับความสามารถในการทำงานได้เดียวกัน คือ พอดีที่จะเคลือบผิวทั้งหมดของมวลรวม และช่วยเติมช่องว่างให้มวลรวมยึดติดกันมากขึ้น ซึ่งขนาดคละของมวลรวมสามารถหาได้จากการทดสอบ Sieve analysis ตามมาตรฐาน ASTM C (1993) โดยข้อกำหนดคุณสมบัติทั่วไปของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตหาได้จากมาตรฐาน ASTM-C33 (2003)

6. ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นคุณสมบัติที่มีผลโดยตรงต่อการดูดซึมน้ำและความพรุน มวลรวมต้องมีรูพรุนพอที่จะดูดซึมน้ำ และมีช่องว่างมากพอที่จะให้น้ำขยายตัวได้ในอุณหภูมิต่ำไม่เช่นนั้นจะทำให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตได้

7. ความสะอาด มวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องมีความสะอาด ไม่มีสิ่งสกปรก สารปนเปื้อน ฝุ่น หรือสารที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพ เพื่อลดผลกระทบของคุณภาพคอนกรีตในระยะยาว

2.1.2.3 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อของวัสดุล้วน ๆ ต่อน้ำหนักของน้ำที่ปริมาตรเท่ากัน แต่กรณีของมวลรวมมีโพรงทั้งน้ำซึมผ่านได้และน้ำซึมผ่านไม่ได้ ดังนั้นทำให้ปริมาตรของมวลรวมจึงมีหลายความหมายและมีหลายประเภทโดยที่นิยมใช้กันมี 3 ประเภทคือ

1. ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity) สามารถคำนวณได้จากปริมาตรของแข็งทั้งหมดรวมถึงช่องว่างที่อยู่ภายในมวลรวม

2. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity) สามารถคำนวณจากปริมาตรของแข็งรวมกับปริมาตรของช่องว่างทั้งหมดที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านไม่ได้ (ไม่รวมปริมาตรของช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของมวลได้แสดงในตารางที่ 2.3

3. ความถ่วงจำเพาะขณะอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity on Saturated surface dry) สามารถคำนวณจากช่องว่างทั้งหมดรวมของแข็งและน้ำในช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ โดยคิดว่าน้ำที่อยู่ในช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้เป็นส่วนหนึ่งของมวลรวมด้วย

โดยการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมสามารถทำได้ตามมาตรฐาน ASTM-C127 (2007) และ ASTM-C128 (2001) และทำการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะแต่ละประเภทดังนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)} = A / (B - C)$$

(2-1)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)} = A / (A - C)$$

(2-2)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะขณะอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity on SSD)} = B / (B - C)$$

(2-3)

โดยที่ A คือน้ำหนักแห้ง
B คือน้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง
C คือน้ำหนักชั่งในน้ำ

ตารางที่ 3 แสดงค่า Apparent specific gravity ของมวลรวมชนิดต่าง ๆ

Rock group	Average specific gravity	Range of specific gravities
Basalt	2.80	2.6 – 3.0
Flint	2.54	2.4 – 2.6
Granite	2.69	2.6 – 3.0
Gritstone	2.69	2.6 – 2.9
Hornfels	2.82	2.7 – 3.0
Limestone	2.66	2.5 – 2.8
Prophyry	2.73	2.6 – 2.9
Quartzite	2.62	2.6 – 2.7

ที่มา: Neville (2011)

2.1.2.4 รูพรุนและการดูดซึมน้ำ

รูพรุนที่พบในในมวลรวมมีทั้งที่เชื่อมต่อถึงกันและไม่เชื่อมต่อถึงกัน การที่มวลรวมเป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีตโดยมีร้อยละ 70 - 80 โดยปริมาตร ของส่วนผสมทั้งหมด รูพรุนที่อยู่ในมวลรวมย่อมต้องส่งผลต่อความพรุนของคอนกรีต โดยทั่วไปปริมาตรของรูพรุนแปรผันตรงกับการดูดซึมน้ำของมวลรวม โดยมวลรวมที่มีความพรุนสูงก็ต้องมีการดูดซึมน้ำที่ดีเช่นกัน เมื่อนำมวล

รวมที่มีความพรุนสูงมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต มวลรวมก็จะดูน้ำออกจากส่วนผสมของคอนกรีตในปริมาณมากทำให้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์(water-cement ratio)ไม่เป็นตามที่ออกแบบไว้

การดูดซึมน้ำสามารถหาได้จากการนำผลต่างระหว่างน้ำหนักมวลรวมแห้งสนิท (Oven dry)กับมวลรวมอิมตัวผิวแห้ง(Saturated surface dry)หารด้วยน้ำหนักของมวลรวมแห้งและคูณด้วย 100 ดังแสดงในสมการที่ (2-4)

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Absorption)} = \left[\frac{B - A}{A} \right] \times 100 \quad (2-4)$$

โดยที่ A คือน้ำหนักแห้ง (Oven dry)

B คือน้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry)

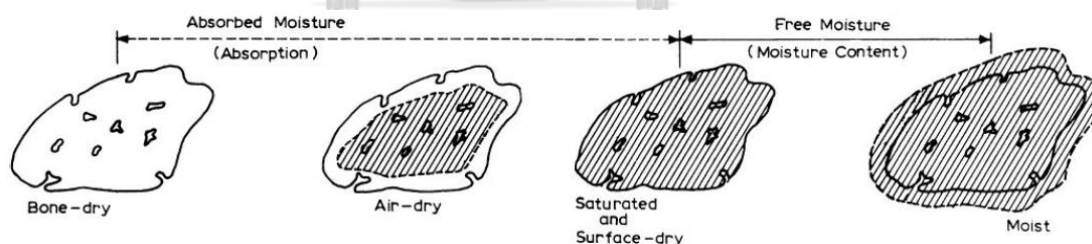
การดูดซึมน้ำมีผลต่อสภาพความชื้นของมวลรวม โดยระดับความชื้นของมวลรวมสามารถแบ่งได้ 4 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

1. มวลรวมแห้งสนิท (Oven-Dry, OD) คือ ทั้งผิวนอกและช่องว่างภายในของมวลรวมทั้งหมดแห้งสนิทโดยความชื้นถูกขับออกด้วยการอบในเตาที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 10 – 12 ชั่วโมง)

2. มวลรวมผิวแห้งในอากาศ (Air-Dry, AD) คือ ผิวนอกมวลรวมแห้ง แต่ยังคงมีน้ำอยู่ภายในรูพรุนของมวลรวม

3. มวลรวมอิมตัวผิวแห้ง (Saturated-Surface-Dry, SSD) คือ รูพรุนทั้งหมดของมวลรวมเต็มไปด้วยน้ำ แต่ผิวนอกแห้ง

4. มวลรวมชุ่มน้ำ (Wet, W) คือ รูพรุนทั้งหมดของมวลรวมเต็มไปด้วยน้ำ และมีน้ำเต็มบนผิวนอกด้วย



รูปที่ 1 สภาพความชื้นในมวลรวม

ที่มา: Neville (2011)

สภาพความชื้นของมวลรวมที่นำมาผสมคอนกรีตมีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด มวลรวมที่สภาพแห้งมากจะดูน้ำออกจากส่วนผสมของคอนกรีตสด ทำให้คอนกรีตเสียน้ำไปบางส่วน ส่งผลให้มีความสามารถในการทำงานได้มีค่าที่ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ กลับกันมวลรวมที่มีปริมาณน้ำมากเกินไปหรือมากกว่าสภาพมวลรวมอิมตัวผิวแห้ง มวลรวมจะคายน้ำเข้าสู่ส่วนผสมคอนกรีตสด ซึ่งจะทำให้น้ำให้คอนกรีตสดมีมากเกินไป ทำให้สัดส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (water-

cement ratio) สูงเกินกว่าที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีกำลังต่ำกว่าที่ออกแบบไว้

2.1.3 วัสดุประสาน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) คือ ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่ยิยมใช้แพร่หลายทั่วโลกในงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ นับเป็นวัตถุดิบหลักและสำคัญในการผลิตคอนกรีต ปูนมอร์ตาร์ และปูนสูตรพิเศษประเภทต่างๆ มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่นๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารปอซโซลาน สารลดน้ำ เป็นต้น การผลิตเริ่มต้นด้วยการบดวัตถุดิบให้เป็นผงละเอียด และนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงจนได้เม็ดปูนซีเมนต์ซึ่งจะถูกนำไปบดเป็นปูนซีเมนต์ผง เพื่อบรรจุในถุงหรือขนส่งทางยานพาหนะต่อไป

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกคิดค้นและผลิตโดยชาวอังกฤษชื่อ Joseph Aspdin โดยชื่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีที่มาจากสีของปูนซีเมนต์ที่ได้เหมือนกับสีของหินปูนบนเกาะปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของไทย คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ มอก.15 เล่ม 1 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพซึ่งทั้งหมดได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ถูกนำไปใช้สำหรับงานก่อสร้างทั่วไป โดยส่วนมากจะนำไปใช้งานกับคอนกรีตเสริมเหล็กในการทำโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) เช่น สะพาน ถนน ท่อระบายน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้หากพูดถึงข้อเสียของปูนซีเมนต์ชนิดนี้ก็คือ ไม่คงทนต่อสารที่เป็นต่างจากน้ำหรือดิน เช่น โรงงานอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) หากนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดนี้ไปผสมกับน้ำจะทำให้มีการคายความร้อนออกมาปริมาณน้อยกว่าประเภทธรรมดา และมีความทนทานต่อความเป็นด่างระดับหนึ่ง เหมาะสำหรับการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น การทำ เขื่อนเก็บน้ำ กำแพงกันดิน สะพานท่าเรือ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะมีค่าความละเอียดที่มาก ส่งผลให้เกิดการแข็งตัว และรับแรงได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง จึงเป็นที่นิยมในการนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็ว แรงดัน และคล่องตัว

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทนี้เหมาะกับงานที่ต้องการคุมทั้งความร้อน และปริมาณที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด การเกิดกำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 4 จะเป็นไปอย่างช้า ๆ เหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกันน้ำ เพราะสามารถทนทานต่อการแตกร้าวจากความร้อนได้มาก

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟตสูง (Sulfate Resistance Portland Cement) เหมาะกับการใช้งานก่อสร้างที่ต้องสัมผัสกับบริเวณที่มี

ต่างสูง เช่น ดิน หรือ ทะเล เพราะมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อสารที่เป็นต่างได้ดี ระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีค่าที่ต่ำที่สุด

นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ อีกที่เป็นที่รู้จัก นั่นก็คือ ปูนซีเมนต์ผสม (Mixed Cement) ที่เหมาะกับการนำมาใช้งานก่อ ฉาบ หรืองานก่อสร้างทั่วไปที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมาก และปูนซีเมนต์ขาว (White Portland Cement) ซึ่งนิยมใช้สำหรับงานตกแต่งอาคารเพื่อความสวยงาม และยังสามารถนำไปผสมเม็ดสีเพื่อทำเป็นปูนซีเมนต์สีต่าง ๆ ได้อีก

2.1.4 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือ ซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed silica fume) เป็นชื่อเรียกวัสดุผสมเพิ่มของคอนกรีตชนิดหนึ่ง เป็นผลพลอยได้จากการเผาวัตถุดิบควอทซ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงร่วมกับถ่านหินในการผลิตซิลิคอนหรือเฟอโรซิลิคอนอัลลอยด์ (Neville, 2011) ในยุคก่อนทศวรรษ 1970 ซิลิกาฟุ้งจัดเป็นวัสดุของเสียทางอุตสาหกรรมมักจะกำจัดโดยการปล่อยสู่บรรยากาศหรือถมทิ้ง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ในปี ค.ศ. 1980 ได้มีศึกษาการนำซิลิกาฟุ้งมาเป็นวัสดุปอซโซลานและนำไปใช้ผสมคอนกรีตกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ในปัจจุบันมีการผสมซิลิกาฟุ้งในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต เช่น เพิ่มกำลังในคอนกรีตกำลังสูง ลดการเยิ้ม น้ำ ลดการแยกตัว เพิ่มความคงทนต่อสารเคมี และเพิ่มความทึบน้ำ เป็นต้น

2.1.5 SUPERPLASTICIZER

สารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต (Concrete Admixtures) คือสารใดๆที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวม ที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือหลังผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆคือ สารเคมีผสมเพิ่ม แร่ผสมเพิ่ม และสารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ โดยสาร Superplasticizers เป็นสารเคมีผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง

สารเคมีผสมเพิ่มแบ่งเป็น 7 ชนิดตามที่ได้แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประเภทของสารเคมีผสมเพิ่ม

ประเภท	ชื่อ	นิยาม
A	สารลดน้ำ (Water-Reducing Admixtures หรือ Plasticizers)	สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวตามที่กำหนด
B	สารหน่วงการก่อตัว (Retarding Admixtures)	สารผสมเพิ่มเพื่อหน่วงเวลาการก่อตัว
C	สารเร่งการก่อตัว (Accelerating Admixtures)	สารผสมเพิ่มเพื่อลดเวลาเวลาการก่อตัว ทำให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วขึ้น

D	สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water-Reducing and Retarding Admixtures)	สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสมคอนกรีตและหน่วงเวลาการก่อตัว
E	สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว (Water-Reducing and Accelerating Admixtures)	เพื่อลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสมคอนกรีตและลดเวลาเวลาการก่อตัว ทำให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วขึ้น
F	สารลดน้ำพิเศษ (High Range Water-Reducing Admixtures หรือ Superplasticizers)	สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำตั้งแต่ 12 % ขึ้นไปที่ต้องใช้ผสมคอนกรีต เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวตามที่กำหนด
G	สารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว (High Range Water-Reducing and Retarding Admixtures หรือ Superplasticizing and Retarding Admixtures)	สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำตั้งแต่ 12 % ขึ้นไปที่ต้องใช้ผสมคอนกรีต เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวตามที่กำหนด และหน่วงเวลา

Superplasticizers จัดอยู่ในสารเคมีผสมเพิ่ม ประเภท F สารลดน้ำพิเศษ ASTM A (2011) สารผสมเพิ่มที่เติมลงในคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำมากกว่าร้อยละ 12 ขึ้นไปแต่ความสามารถในการทำงานได้เท่าเดิม เมื่อมีการใช้สาร Superplasticizers เป็นน้ำยาผสมคอนกรีตประเภทโพลีคาร์- บ็อกซิเลต จะไปเพิ่มการไหลของคอนกรีตสดให้เทได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะเหมาะกับงานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่ และต้องการใช้คอนกรีตกำลังสูง โดยงานวิจัยนี้ใช้ Sika ViscoCrete-10

2.1.6 การหลุดล่อนของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้

แม้ว่าคอนกรีตจะเป็นวัสดุที่แข็งแรงและสามารถทนไฟได้ดี แต่ก็ยังสามารถพบปัญหาการหลุดล่อนของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้ เนื่องจากการขยายตัวของวัสดุที่มีการขยายตัวไม่เท่ากัน สาเหตุดังกล่าวส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ อีกทั้งยังพบอีกว่าในสภาพปกติคอนกรีตจะมีการกักเก็บน้ำอยู่ภายในช่องว่างตามธรรมชาติ ภายในเนื้อคอนกรีต และเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงในระยะเวลาหนึ่งจึงทำให้น้ำที่อยู่ในช่องว่างดังกล่าวเกิดการระเหยออกไป ซึ่งส่งผลให้เกิดความดันไอในโพรง (Pore pressure) และอาจจะดันให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ โดยความรุนแรงของการหลุดล่อนของคอนกรีตมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งความสามารถในการให้ซึมผ่าน (Permeability) กำลังรับแรงอัด อายุขนิດ และขนาดของมวลรวม อัตราส่วนน้ำหนักรวมถึงปริมาณและระยะหุ้มเหล็กเสริม

อย่างไรก็ตามสามารถจำแนกลักษณะการผุกร่อนของคอนกรีตได้ 6 ประเภท ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 รายละเอียดและลักษณะของการหลุดล่อนประเภทต่างๆ

ประเภทของการหลุดล่อน	เวลาที่เกิด	ลักษณะการเกิด	ผลกระทบต่อโครงสร้าง	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการหลุดล่อน
การหลุดล่อนของมวลรวม	7-30 นาที	กะเทาะ/มีเสียงเล็กน้อย	เล็กน้อย	ความร้อน มวลรวม คอนกรีต
การหลุดล่อนบริเวณมุม	30-90 นาที	ไม่รุนแรง/ไม่มีเสียง	อาจรุนแรง	ความร้อน มวลรวม คอนกรีต เหล็กเสริม
การหลุดล่อนบริเวณผิว	7-30 นาที	รุนแรง/มีเสียงร้าว	อาจรุนแรง	ความร้อน คอนกรีต
การหลุดล่อนแบบระเบิด	7-30 นาที	รุนแรง/มีเสียงระเบิด	รุนแรง	ความร้อน มวลรวม คอนกรีต หน้าตัด เหล็กเสริม น้ำหนักบรรทุกทุก การเหี่ยวรั้ง
การหลุดล่อนแบบลอกหลุด	เมื่อคอนกรีตเสื่อมสภาพ	ไม่รุนแรง/ไม่มีเสียง	อาจรุนแรง	ความร้อน คอนกรีต เหล็กเสริม น้ำหนักบรรทุกทุก การเหี่ยวรั้ง
การหลุดล่อนหลังทำให้เย็น	ระหว่างและหลังทำให้เย็น	ไม่รุนแรง/ไม่มีเสียง	อาจรุนแรง	ความร้อน มวลรวม คอนกรีต เหล็กเสริม น้ำหนักบรรทุกทุก การเหี่ยวรั้ง

ที่มา: ธัญวัฒน์ โพธิศิริ (2556)

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการเพื่อลดผลกระทบจากกาหลุดล่อนของคอนกรีตในสถานะไฟไหม้โดยการเพิ่มเส้นใย ลงในส่วนผสมของคอนกรีต โดยเส้นใยจะละลายเมื่ออุณหภูมิสูงจนทำให้เกิดโพรงขนาดเล็กในเนื้อคอนกรีต ซึ่งโพรงขนาดเล็กนี้จะมีส่วนช่วยลดความดันไอจากการระเหยน้ำในเนื้อคอนกรีต ซึ่งจะสามารถช่วยลดความรุนแรงและป้องกันการหลุดล่อนได้ (ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 2556)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 คอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกา

ในงานวิจัยปัจจุบันได้มีการศึกษาและนำซิลิกามาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม (Singh, Nagar, & Agrawal, 2016) หลายงานวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติของการใช้ประโยชน์ของซิลิกาฟุ่ม ในการเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีต โดยพบว่า การเติม ซิลิกาฟุ่ม จะมีส่วน

ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ในทุกช่วงของปฏิกิริยา และจะมีผลมากในช่วงแรกของการเริ่มปฏิกิริยา ในการเติมสารดังกล่าวยังมีผลทำให้การแพร่ของคลอไรด์ไอออน (chloride-ion) ลดลง โดยเป็นผลจากการที่ silica fume ทำให้ช่องทางการผ่านของไอออน (ion) เปลี่ยนแปลงโดยลดขนาดของช่องจากช่องใหญ่ไปสู่ช่องที่มีขนาดเล็กลง อีกทั้งยังพบอีกว่าการเติม ซิลิกาฟุม มีส่วนช่วยในการลดการกัดกร่อนในระยะยาว การขยายส่วนของอัลคาไลน์ซิลิกา (alkali-silica) แต่เพิ่มปฏิกิริยาการคาร์บอนมากขึ้น (Khan & Siddique, 2011) แม้ว่าการเพิ่มซิลิกาฟุมจะมีประโยชน์ต่อคอนกรีตอยู่มากแต่การนำมาใช้จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีต (Babu & Prakash, 1995) ในปี ค.ศ. 2004 ได้มีการศึกษาปริมาณการแทนที่ของซิลิกาฟุมในคอนกรีต 4 ระดับ คือ ที่ร้อยละ 0 6 10 และ 15 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าซิลิกาฟุมไม่มีผลต่อการหดตัว (shrinkage) ของคอนกรีต และสัดส่วนของซิลิกาฟุมที่เพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้ความสามารถในการเท (Workability) ของคอนกรีตลดลงโดยเมื่อสัดส่วนของซิลิกาฟุมมากขึ้นจะมีแนวโน้มในการต้องการสาร Superplasticizers เพิ่มมากขึ้นและ ค่ากำลังอัด (Compressive strength) จะไม่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อบ่มที่ 90 วัน แต่กลับพบว่าค่ากำลังอัดและค่ามอดูลัสแบบซีแคนต์ (secant modulus) มีการเปลี่ยนแปลง (Mazloom, Ramezaniapour, & Brooks, 2004) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัย ในปี ค.ศ. 2009 ได้มีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีการแทนที่ของซิลิกาฟุม ในระดับที่แตกต่างกัน กับคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของซิลิกาฟุม โดยทดสอบในคอนกรีตทั้ง 2 ประเภท คือ M40 และ M50 ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ของซิลิกาฟุม ในระดับร้อยละ 12 มีค่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด (compressive strength) กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Splitting tensile strength) และ ความแข็งแรงของการดัดงอ (flexural strength) ในคอนกรีตทั้ง 2 ประเภท และจะมีการลดลงที่ 28 วัน อีกทั้งยังพบอีกว่าในอัตราส่วนดังกล่าวยังสามารถทำให้ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ $E_c = 32.19$ จิกะปาสกาล ในคอนกรีต M40 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 28.06 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีส่วนประกอบของซิลิกาฟุม (Bhikshma, Nitturkar, & Venkatesham, 2009) แม้ว่าซิลิกาฟุม จะมีส่วนช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น แต่ก็มีการศึกษาการผสมซิลิกาฟุมกับสารตัวอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตให้มากยิ่งขึ้นโดยในปี ค.ศ. 2000 มีศึกษาการใช้ซิลิกาฟุมร่วมกับปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzola) เป็นส่วนประกอบในคอนกรีตพบว่าสามารถเพิ่ม กำลังอัด กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ความสามารถในการเทของคอนกรีต และ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elastic modulus of concretes) ได้มากกว่าการใช้ซิลิกาฟุมหรือปอซโซลานธรรมชาติเพียงอย่างเดียว (Shannag, 2000)

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถระบุได้ว่าการใช้ซิลิกาสามารถเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้สูงขึ้นได้และเมื่อผสมสารที่มีคุณสมบัติในการช่วยส่งเสริมการปรับปรุงโครงสร้างของคอนกรีตก็จะยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตให้เพิ่มมากขึ้น

2.2.2 เศษหินแกรนิตและหินปูน

เศษหินแกรนิตเกิดจากการตัดและบดหินแกรนิต ซึ่งเศษหินดังกล่าวมีลักษณะเป็นผง และไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงเกิดเป็นมลพิษทางอากาศ การนำเศษหินแกรนิตไปใช้ประโยชน์จึงถือว่าเป็น

การลดมลพิษทางอากาศได้ ปัจจุบันได้มีการศึกษาโดยนำเศษหินแกรนิตไปใช้โยชนในการเพิ่มคุณสมบัติของซีเมนต์ (Singh, Nagar, et al., 2016) ทั้งในด้านความสามารถในการทำงานเท โดยพบว่าเมื่อคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษหินแกรนิต ร้อยละ 25 จะเพิ่มความสามารถในการทำงานได้มากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของหินแกรนิต (Raghavendra, Sharada, & Ravindra, 2015) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมของขนาดของเศษหินแกรนิตต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดลดลง ความสามารถในการผสมซีเมนต์มีการลดลงด้วยเช่นกัน (Falade, 1999) Raghavendra et al. (2015) ได้ศึกษาความสามารถในการทำงานได้ของซีเมนต์โดยใช้ค่า slump value พบว่าค่า slump value มีการลดลงจาก 85 มม. – 70 มม. เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของเศษหินแกรนิตตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 25 ของการแทนที่

คุณสมบัติของซีเมนต์ที่มีการผสมของเศษหินแกรนิตต่อกำลังอัด ได้มีการศึกษาเช่นเดียวกัน ในปี ค.ศ. 2002 มีการทดลองเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์ที่มีการผสมด้วยทรายแกรนิต 530 กก./ลบม. และ ซีเมนต์ที่มีการผสมด้วยทรายธรรมชาติในปริมาณเท่ากัน พบว่าซีเมนต์ที่มีการผสมทรายแกรนิตมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์ที่ผสมทรายธรรมชาติ (Donza, Cabrera, & Irassar, 2002) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวยังสอดคล้องกับการทดลองในปี ค.ศ. 2011 โดยได้ศึกษาการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่การใช้ทรายในคอนกรีต PKSC (Palm kernel shell concrete) โดยผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของเศษหินแกรนิตสามารถเพิ่มกำลังอัดของซีเมนต์ได้และจะมีค่าเพิ่มสูงที่สุดเมื่อแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตทั้งหมด (Babafemi & Olawuyi, 2011)

ในหลาย ๆ งานวิจัยระบุว่าการเพิ่มเศษหินแกรนิตเข้าไปในซีเมนต์สามารถทำให้ซีเมนต์มีกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต เพิ่มมากขึ้น (Abd Elmoaty, 2013; Singh, Nagar, et al., 2016; Vijayalakshmi & Sekar, 2013) Arulraj, Adin, and Kannan (2013) ได้ศึกษาการแทนที่ของเศษหินแกรนิตต่อกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตโดยเปรียบเทียบของการแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 25 ของการแทนที่ในคอนกรีต 3 ประเภทคือ M20, M30 และ M40 ที่ 28 วันโดยผลการทดลองพบว่าการเกิดแรงดึงของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีส่วนประกอบของเศษหินแกรนิตเป็นส่วนประกอบร้อยละ 20 ของส่วนประกอบ

จากการทดลองที่ผ่านมาสามารถระบุได้ว่าการแทนที่ของเศษหินแกรนิตสามารถทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางด้านต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น จึงเหมาะสมที่จะมาใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัสดุหลักประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิต มวลรวมหยาบ Superplasticizers และซิลิกาฟุ้ง ซึ่งรายละเอียดของวัสดุมีดังนี้

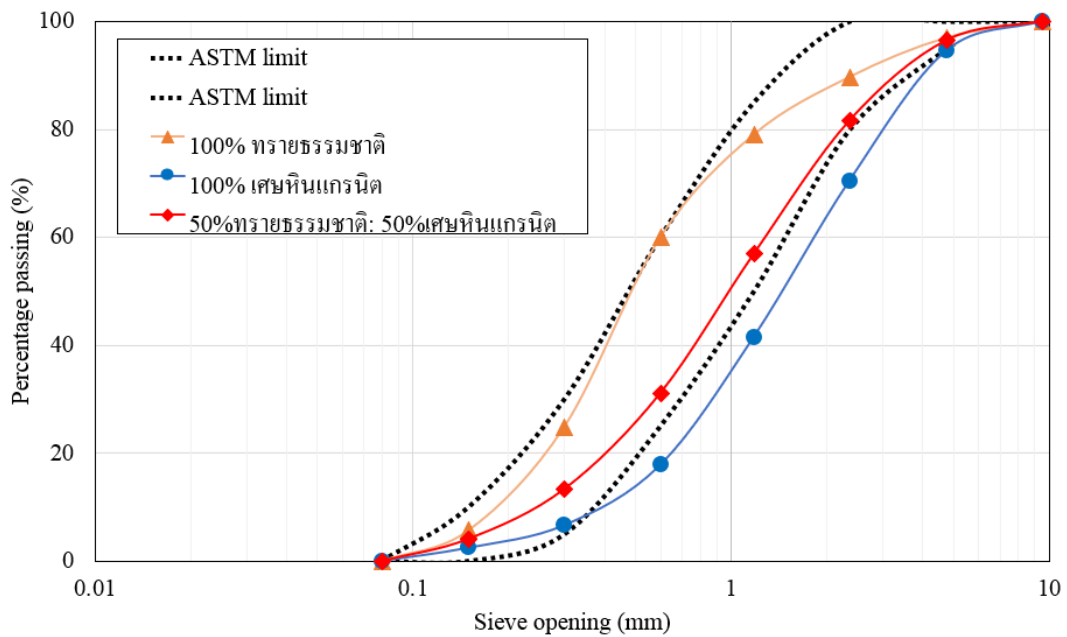
- 1) ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
- 2) Superplasticizers Sika ViscoCrete-10 นํ้ายาผสมคอนกรีตประเภทโพลีคาร์ - บ็อกซิเลต
- 3) ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica)
- 4) มวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ โดยมีคุณสมบัติตามตารางที่ 6
- 5) มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตได้จากเหมืองเทพศิลา ในจังหวัดชลบุรี โดยมีคุณสมบัติตามตารางที่ 6 โดยก่อนจะนำทรายแกรนิตมาใช้ต้องผ่านกระบวนการดังนี้
 - 5.1 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อทำการคัดแยกกระหว่าหินกรวดกับทรายจากหินแกรนิต
 - 5.2 นำทรายจากเศษหินแกรนิตมาล้างน้ำเพื่อเอาส่วนที่เป็นฝุ่นออก
 - 5.3 นำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นออกจากเศษหินแกรนิต
- 6) มวลรวมหยาบจากหินปูนย่อย (Crushed natural limestone) ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 7

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิต

มวลรวม	ความถ่วงจำเพาะ	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	การดูดซึมนํ้า (%)	โมดูลัสความละเอียด (F.M)
ทรายธรรมชาติ	2.58	1,665	0.72	2.44
เศษหินแกรนิต	2.59	1,540	0.88	3.67

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะรวม (สภาวะอิมตัวผิวแห้ง)	2.70
ร้อยละการดูดซึมนํ้า	0.60
หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	1,621



รูปที่ 2 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้แทนทรายธรรมชาติตามมาตรฐาน ASTM C33

3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมซีลีกาฟุ่มที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษวัสดุ โดยใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry ;SSD) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมของคอนกรีตได้แสดงในตารางที่ 8 การผสมคอนกรีตมี 3 ขั้นตอนใช้เวลา 8 นาที ขั้นตอนแรกใส่ส่วนผสมทั้งหมดแล้ว ผสมกันเป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นพักการผสมไว้ 3 นาที สุดท้ายผสมอีก 2 นาที เมื่อผสมเรียบร้อยแล้วนำคอนกรีตมาเข้าแบบหล่อที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบ ส่วนการบ่มนั้นจะใช้วิธีการแช่น้ำแล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องก่อนจะนำตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 8 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ (kg/m^3)

ส่วนผสม	OPC	น้ำ	หิน	ซิลิกา ฟูม	SP	ทรายแม่น้ำ	เศษหิน แกรนิต (GW)
0GW	552	110	960	0%	22	558	
0GW-3	552	110	960	3%	22	558	
0GW-6	552	110	960	6%	22	558	
0GW-9	552	110	960	9%	22	558	
50GW	552	110	960	0%	22	279	279
50GW-3	552	110	960	3%	22	279	279
50GW-6	552	110	960	6%	22	279	279
50GW-9	552	110	960	9%	22	279	279
100GW	552	110	960	0%	22		558
100GW-3	552	110	960	3%	22		558
100GW-6	552	110	960	6%	22		558
100GW-9	552	110	960	9%	22		558

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 รายละเอียดการทดสอบ

การทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด (Fresh concrete) และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened concrete) การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตจะถูกทดสอบหลังจากผสมคอนกรีตโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 (2014) ส่วนการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะทำการทดสอบตามมาตรฐานที่ได้แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 มาตรฐานที่ใช้ทดสอบและตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	ขนาดตัวอย่าง	อายุของการบ่มตัวอย่างที่ทดสอบ
ความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีต	ASTM C1611 (2014)	-	-
กำลังรับแรงอัด (Compressive strength)	ASTM C39 (2021)	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	7 วัน 28 วัน และ 90 วัน
กำลังดึงแยก (Splitting Tensile Strength)	ASTM C496 (2011)	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	28 วัน
กำลังดัด Flexural Strength	ASTM C78 (2016)	คาน ขนาด 10x10x35 cm	28 วัน
ปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำ	ASTM C642 (2013)	ทรงลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 cm	28 วัน
ทดสอบความต้านทานของคอนกรีตภายใต้สภาวะเพลิงไหม้	ISO-834 (1999) มอก. 1334 เล่ม 1	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	28 วัน

3.4 การวิเคราะห์ผล

งานวิจัยครั้งนี้จะวิเคราะห์ผลจากการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ่ม โดยใช้ทรายแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในสัดส่วนร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยทดสอบที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 0, 3, 6, 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ซึ่งส่วนผสมเป็นไปตามตารางที่ 8 แล้ววิเคราะห์ผลการทดสอบการรับกำลังอัด กำลังดึงแยก กำลังดัด ความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีต ปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำ และอัตราการซึมของน้ำภายในคอนกรีต หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาปริมาณทรายแกรนิตและปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสม เพื่อการประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อไป

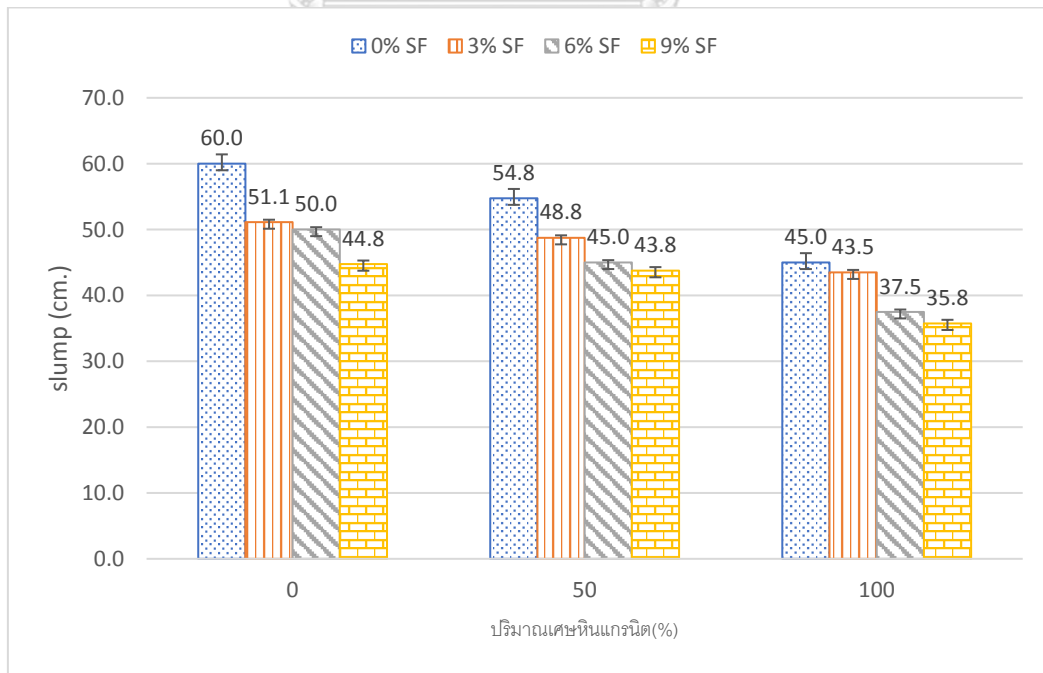
บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปราย

คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟูมใช้มวลรวมละเอียดจากวัสดุรีไซเคิลที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM-C1611 (2005) กำลังรับแรงอัด,กำลังดึงแยก, กำลังรับแรงดัด, โพรงและการดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อสถานะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ISO-834 (1999) ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ความสามารถในการทำงานได้

ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากวัสดุรีไซเคิลโดยวัดค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM-C1611 (2005) ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก(0GW-0, 50GW-0และ100GW-0) มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 60.0, 54.8 และ 45.0 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 3 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-3, 50GW-3และ100GW-3) การไหลแผ่มีค่าเท่ากับ 51.1, 48.8 และ 43.5 เซนติเมตร ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 6 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-6, 50GW-6และ 100GW-6) การไหลแผ่มีค่าเท่ากับ 50.0, 45.0 และ 37.5 เซนติเมตรและส่วนผสมซิลิกาฟูมในร้อยละ 9 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-9, 50GW-9และ100GW-9) ค่าการไหลแผ่เท่ากับ 44.8, 43.8 และ 35.8 เซนติเมตร



รูปที่ 3 ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต

จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเศษหินแกรนิต โดยความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ทรายธรรมชาติทั้งหมดไม่ถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตเลย ซึ่งมีสาเหตุมาจากเศษหินแกรนิตมีลักษณะที่หยาบ มีรูพรุนมากกว่าทรายธรรมชาติ ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าทรายธรรมชาติและมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าและมีความฝืดมากกว่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ(Singh, Khan et al. 2016) และ (Vijayalakshmi and Sekar 2013) ดังนั้นความต้องการน้ำเพื่อมาเคลือบผิวของมวลรวมจึงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khine (2018); Raghavendra et al. (2015); Singh, Khan, Khandelwal, Chugh, and Nagar (2016) ที่ศึกษาผลกระทบของเศษหินแกรนิตต่อคอนกรีต พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Manasseh (2010) ที่พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีต

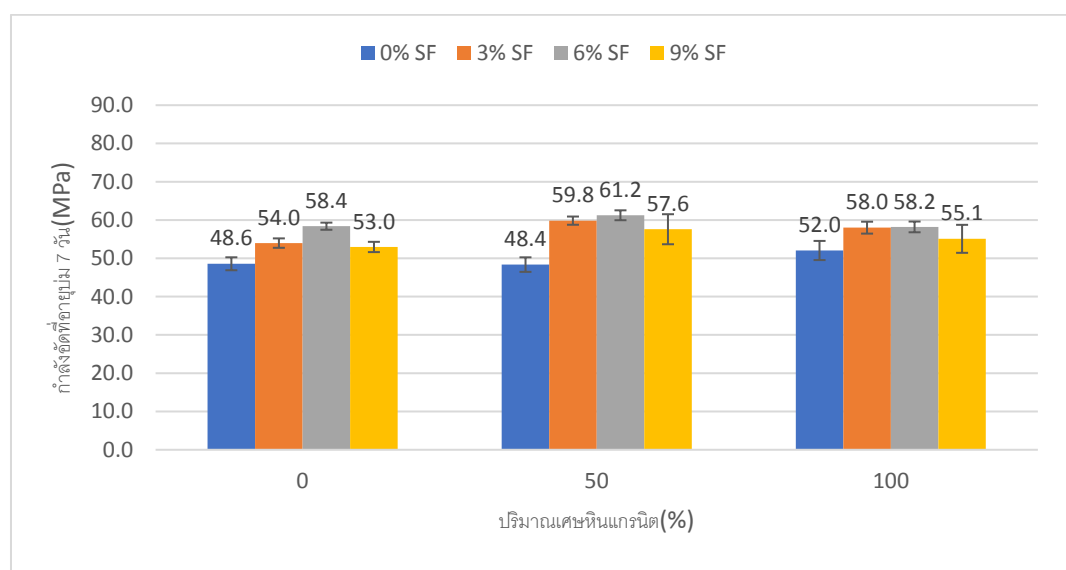
เมื่อมีการผสมซิลิกาฟุ่มในส่วนผสมพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้น โดยความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อมีปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 9 โดยน้ำหนักซีเมนต์ เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีอนุภาคที่เล็กมากๆ จึงมีการใช้น้ำที่สูง ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง

ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณเศษหินแกรนิตและซิลิกาฟุ่มมีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต โดยที่ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตจะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเศษหินแกรนิตเพิ่มขึ้น และเมื่อผสมซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์เข้าไปในแต่ละส่วนผสม ส่งผลให้มีความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตตัวอย่างลดลง

4.2 กำลังรับแรงอัด

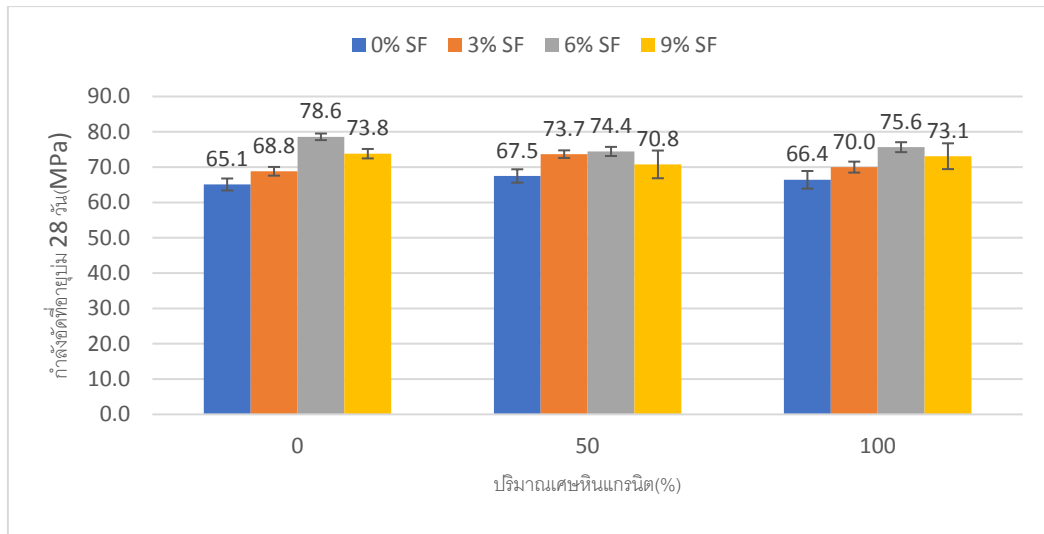
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่าคอนกรีตที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 48.4 และ 52.0 MPa ตามลำดับ ซึ่งการแทนที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 100 มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติโดยไม่มีการแทนที่ ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 48.6 MPa แต่ที่การแทนที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 50 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน เมื่อคอนกรีตมีอายุบ่มที่ 28 และ 90 วันพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน โดยอาจจะกล่าวได้ว่าลักษณะทางกายภาพของเศษหินแกรนิตที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมจึงมีบทบาทที่สำคัญในการพัฒนากำลังในระยะต้นของคอนกรีต ส่วนกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 และ 90 วันมีกำลังใกล้เคียงกัน อาจมีสาเหตุมาจากเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวทางเคมีระหว่างมวลรวม

ละเอียดและเพสต์จะมีความสำคัญในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าความเป็นเหลี่ยมมุมหรือลักษณะทางกายภาพของมวลรวมละเอียด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vijayalakshmi and Sekar (2013) ได้ศึกษาผลกระทบของเศษหินแกรนิตต่อคอนกรีต พบว่าส่วนผสมที่มวลรวมละเอียดจากรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นมากที่อายุบ่ม 7 วัน แต่เมื่ออายุ 28 และ 90 วันจะมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกันกับส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Khine (2018) ที่พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเศษหินแกรนิตเพิ่มขึ้นในคอนกรีตกำลังสูง

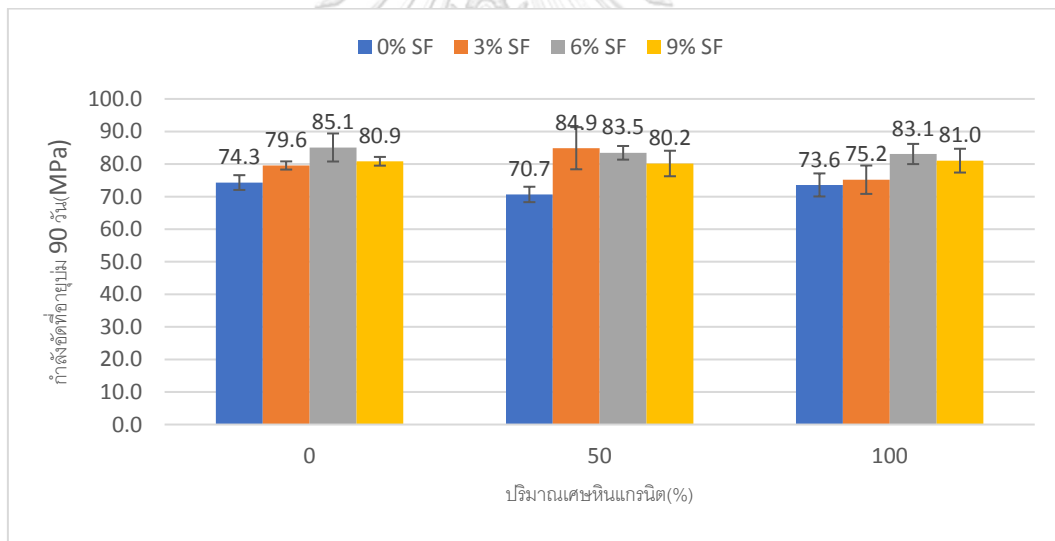


รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน

จากรูปที่ 4, 5 และ 6 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วันของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักซีเมนต์ พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของตามปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ผสมเข้าไปจนถึงร้อยละ 6 โดยน้ำหนักซีเมนต์ แต่เมื่อมากกว่า ร้อยละ 6 พบว่ากำลังอัดจะลดลงแต่ยังคงมีค่ามากกว่าไม่ได้ใส่ซิลิกาฟุ่มเลย ยกตัวอย่างเช่นส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนทรายธรรมชาติที่เท่ากัน(ร้อยละ 50โดยน้ำหนัก)และผสมซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 3, 6, และ 9 (50GW-3, 50GW-6และ 100GW-9) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 59.8, 61.2 และ 57.6 MPa ตามลำดับ มากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่มซึ่งมีค่าเท่ากับ 48.4 MPa ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 73.7, 74.4 และ 70.8 MPa ตามลำดับ มากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่มซึ่งมีค่าเท่ากับ 67.5 MPaและที่อายุ 90 วันเท่ากับ 84.9, 83.5 และ 80.2 MPa ตามลำดับ มากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่มซึ่งมีค่าเท่ากับ 70.7 MPa



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 90 วัน

4.3 กำลังดึงแยก

จากการทดสอบกำลังดึงแยกที่อายุบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ่มที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและใส่ซิลิกาฟุ่มที่ ร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักซีเมนต์ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7 คำนวณจากสมการ 4-1 ตามมาตรฐาน ASTM C496 จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก(0GW-0, 50GW-0และ100GW-0) มีค่ากำลังดึงแยกเท่ากับ 4.3, 4.4 และ 4.2 Mpa ตามลำดับพบว่ากำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติมีกำลัง

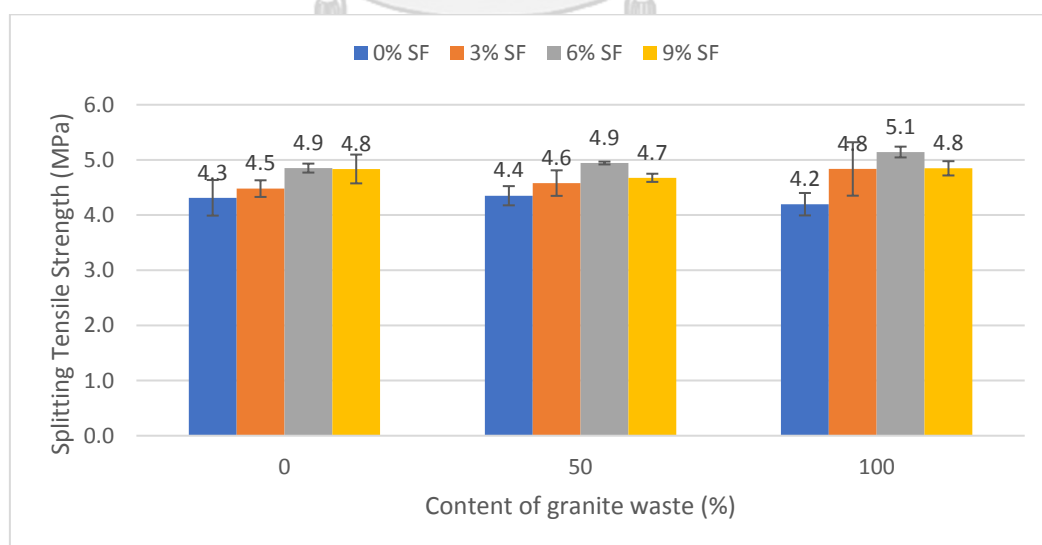
ดิ่งแยกต่ำลงเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Arivumangai and Felixkala (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตที่ร้อยละ 0, 25, และ 50 พบว่าถ้าใช้เศษหินแกรนิตทดแทนทรายธรรมชาติเกินร้อยละ 25 กำลังดิ่งแยกจะลดลงมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิต เมื่อผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-3, 50GW-3 และ 100GW-3) มีค่ากำลังดิ่งแยกเท่ากับ 4.5, 4.6 และ 4.8 Mpa ผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-6, 50GW-6 และ 100GW-6) มีค่ากำลังดิ่งแยกเท่ากับ 4.9, 4.9 และ 5.1 Mpa และส่วนผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-9, 50GW-9 และ 100GW-9) มีค่ากำลังดิ่งแยกเท่ากับ 4.8, 4.7 และ 4.8 Mpa แสดงให้เห็นว่ากำลังดิ่งแยกของคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วนและคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนักนั้นมีค่าใกล้เคียงกันแต่แนวโน้มของการผสมซีเมนต์พบว่าการผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ 6 โดมน้ำหนักของซีเมนต์นั้นมีค่ามากที่สุด

$$T = 2P / \pi ld - (4-1)$$

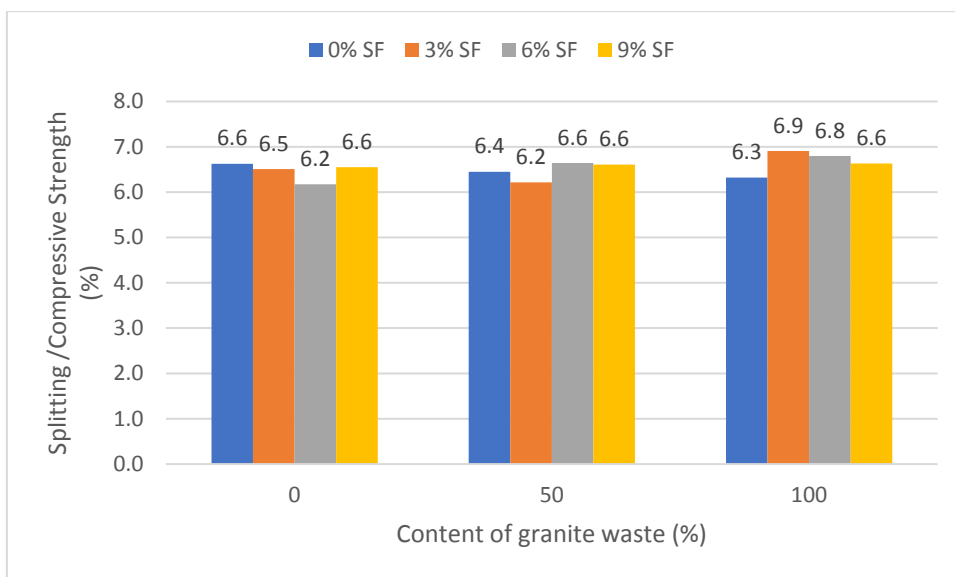
โดย T = กำลังดิ่งแยก (MPa) d = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (mm)

P = แรงที่มากที่สุดที่ใช้ทดสอบโดยเครื่องทดสอบ (N)

L = ความยาวของตัวอย่าง (mm)



รูปที่ 7 กำลังดิ่งแยกของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 8 ร้อยละความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแยกและกำลังรับแรงอัด ที่อายุบ่ม 28 วัน

4.4 กำลังรับแรงดัด

วัสดุสามารถทนทานต่อแรงที่จะทำให้วัสดุเกิดการโค้งงอ (Flexural Strength) หรือความแข็งแรงในด้าน การดัด (Bending) ของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและผสมซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 0, 3, 6, และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ผลการทดสอบแสดงได้จากรูปที่ 9 ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 4.2 ตามมาตรฐาน ASTM – C78 (2016) จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่ยังไม่ใส่ซิลิกาฟุ่ม เท่ากับ 8.0, 8.0 และ 8.1 MPa ซึ่งกำลังดัดที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนทรายธรรมชาติทั้งหมดมีค่าสูงกว่าใช้ทรายธรรมชาติล้วนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kala (2013) ศึกษาการใช้หินแกรนิตแทนทรายธรรมชาติในคอนกรีตพบว่า กำลังดัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษหินแกรนิตที่ใช้แทนทรายธรรมชาติ โดยการแทนที่ที่ร้อยละ 25 กำลังดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.5 - 19.88 เมื่อเทียบกับการใช้ทรายธรรมชาติล้วน และที่การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตทั้งหมดพบว่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.65 - 4.7 เมื่อเทียบกับทรายธรรมชาติล้วน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเศษหินแกรนิตมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังดัดที่ดีขึ้น เพราะรูปร่างของเศษหินแกรนิตนั้นช่วยในการจับตัวกันระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ (Singh, Khan, et al., 2016) ในส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตมีกำลังดัดใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khine (2018) ที่พบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะความเป็นเหลี่ยมมุมและผิวขรุขระของเศษหินแกรนิตช่วยยึดเกาะมวลรวมและซีเมนต์เพสต์

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (4.2)$$

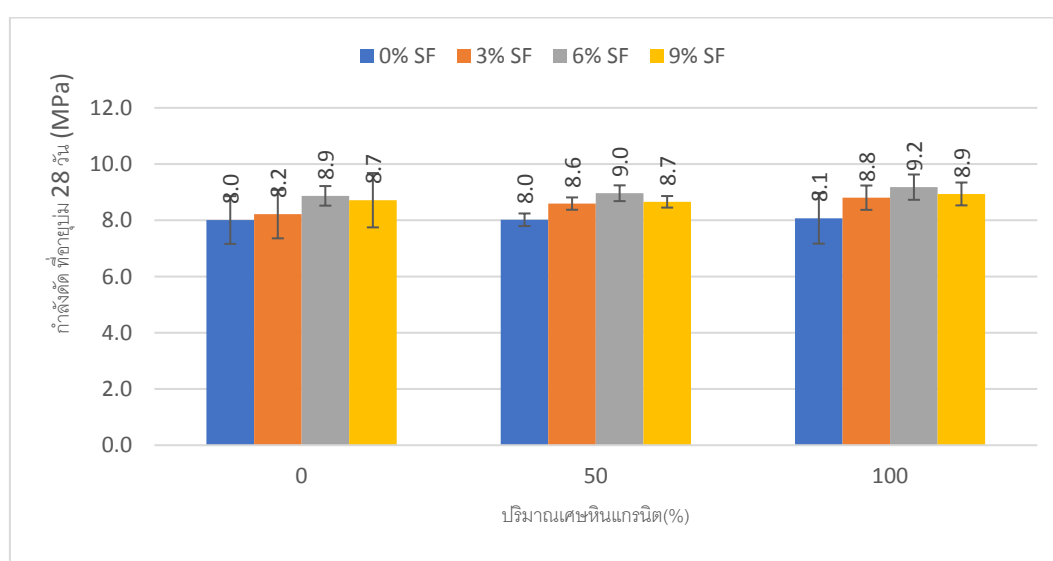
โดย $R =$ กำลังดัด (MPa)
(mm)

$d =$ ความลึกของตัวอย่าง

$P =$ แรงที่มากที่สุดที่ใช้ทดสอบโดยเครื่องทดสอบ (N)
(mm)

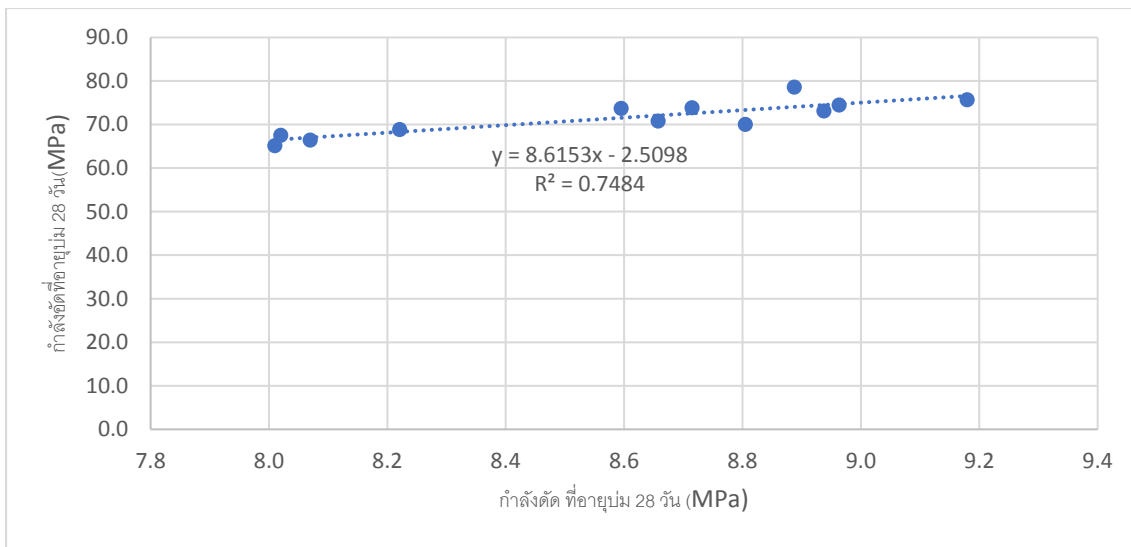
$b =$ ความกว้างของตัวอย่าง

$L =$ ความยาวของตัวอย่าง (mm)



รูปที่ 9 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

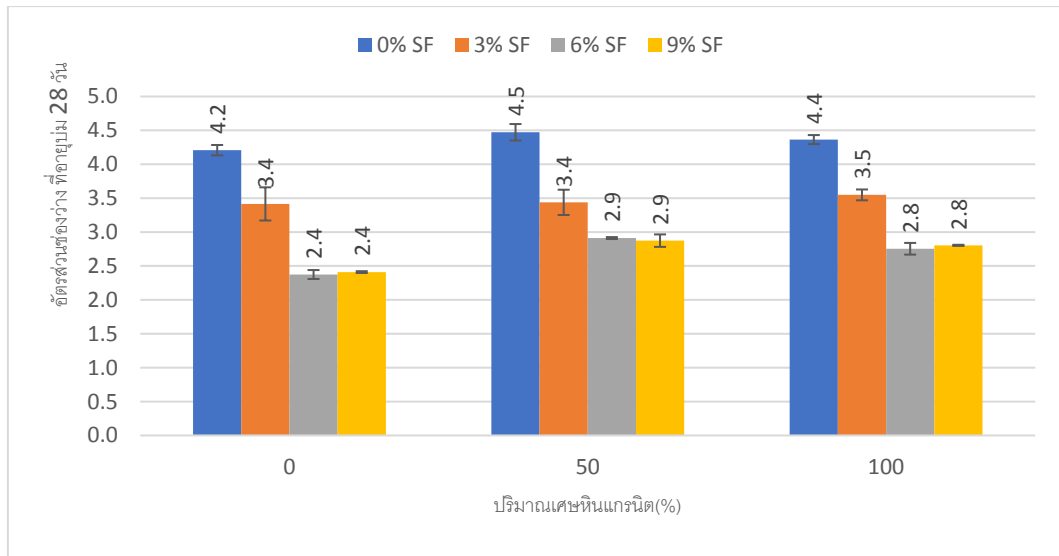
เมื่อผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 3 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-3, 50GW-3 และ 100GW-3) มีค่ากำลังดัดเท่ากับ 8.2, 8.6 และ 8.8 Mpa ผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 6 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-6, 50GW-6 และ 100GW-6) มีค่ากำลังดัดแยกเท่ากับ 8.9, 9.0 และ 9.2 Mpa และส่วนผสมซิลิกาฟุ่มในร้อยละ 9 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (0GW-9, 50GW-9 และ 100GW-9) มีค่ากำลังดัดแยกเท่ากับ 8.7, 8.7 และ 8.9 Mpa แสดงให้เห็นว่ากำลังดัดแยกของคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วนและคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนักนั้นมีค่าใกล้เคียงกันแต่แนวโน้มของการผสมซิลิกาฟุ่มพบว่ากำลังดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดซึ่งแสดงในรูปที่ 10



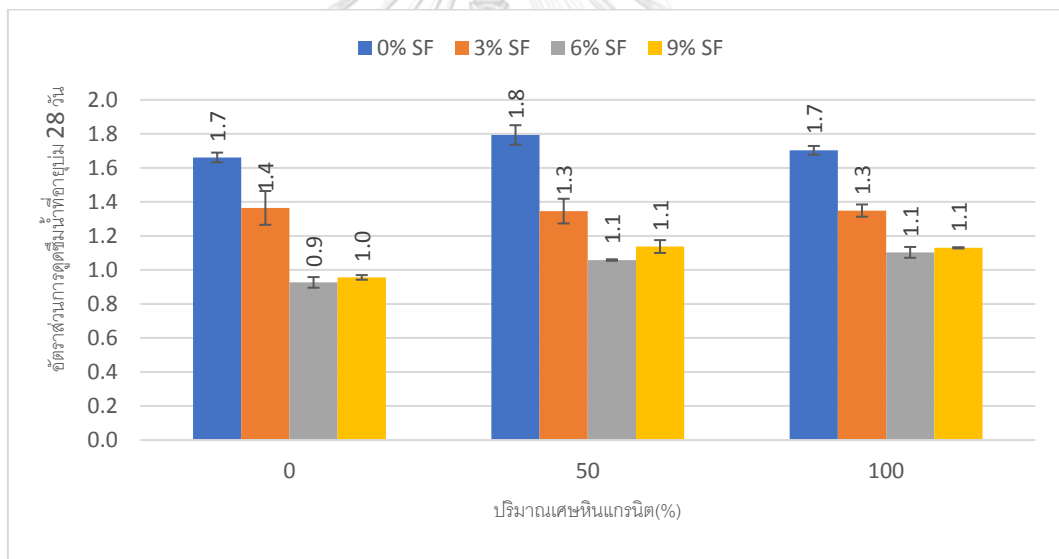
รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงตัดและกำลังรับแรงอัด

4.5 โพรงและการดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 11 และ 12 แสดงผลการทดสอบร้อยละปริมาณโพรงของคอนกรีตที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักมีร้อยละปริมาณโพรงเท่ากับ 4.2, 4.5 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าร้อยละปริมาณโพรงมีค่าไม่ต่างกัน แต่เมื่อผสมซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ร้อยละปริมาณโพรงลดลงตามปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้นจนถึงที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักซีเมนต์ เมื่อปริมาณซิลิกาฟุ่มมากกว่าร้อยละ 6 ร้อยละปริมาณโพรงจะมีค่าไม่ต่างจากที่ร้อยละ 6 ยกตัวอย่างเช่น ที่การแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และผสมซิลิกาฟุ่มปริมาณที่แต่ต่างกันคือ ร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 4.5, 3.4, 2.9 และ 2.9 ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพบว่าที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักมีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.7, 1.8 และ 1.7 ตามลำดับ พบว่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อผสมซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ร้อยละดูดซึมน้ำลดลงตามปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้นจนถึงที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักซีเมนต์ เมื่อปริมาณซิลิกาฟุ่มมากกว่าร้อยละ 6 ร้อยละการดูดซึมน้ำจะมีค่าไม่ต่างจากที่ร้อยละ 6 ยกตัวอย่างเช่น ที่การแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และผสมซิลิกาฟุ่มปริมาณที่แต่ต่างกันคือ ร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 1.8, 1.3, 1.1 และ 1.1 ตามลำดับ ซึ่งร้อยละปริมาณโพรงของคอนกรีตและร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



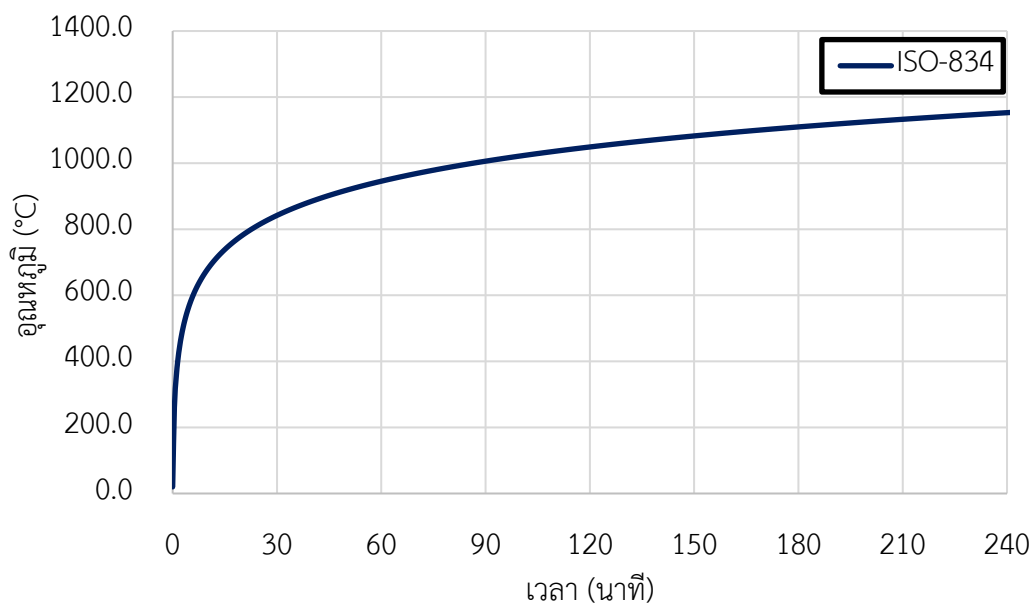
รูปที่ 11 ร้อยละปริมาณโพรงของคอนกรีต



รูปที่ 12 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

4.6 ความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้

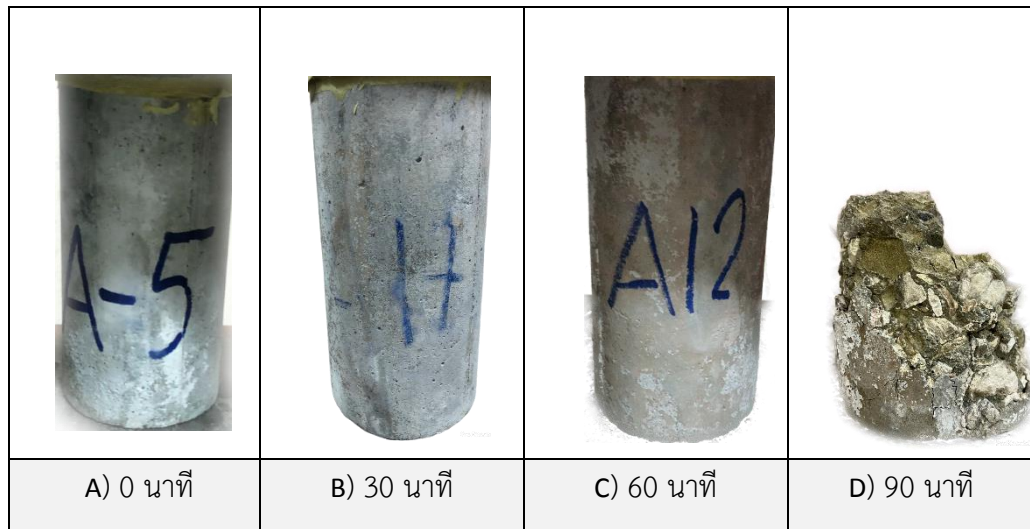
ความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้ซึ่งเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่สำคัญในการพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างให้มีความปลอดภัย ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ศึกษาอัตราการทนไฟของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมระเอียดจากเศษหินแกรนิตและผสมซิลิกาฟุ่ม โดยศึกษาความเสียหายและกำลังอัดคงค้าง (Residual compressive strength) ภายหลังจากการเผาไฟตามมาตรฐาน ISO-834 (1999) เป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยวางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำมาทดสอบ



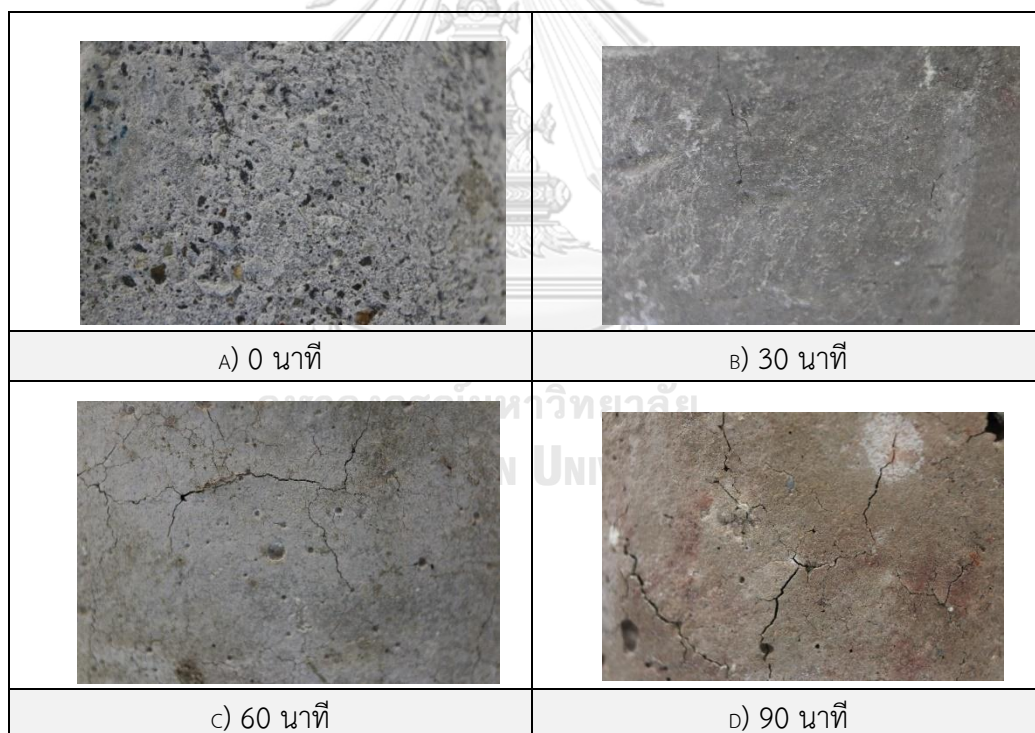
รูปที่ 13 อุณหภูมิทดสอบสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834

4.6.1 ความเสียหายของคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ

การวิเคราะห์ความเสียหายของคอนกรีตหลังเผาไฟวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงคอนกรีตหลังเผาไฟที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนคือ สีของและสภาพของพื้นผิวของตัวอย่างคอนกรีตที่เปลี่ยนไปหลังจากการทดสอบเผาไฟ ซึ่งแสดงในรูปที่ 14 ตัวอย่างคอนกรีตก่อนการทดสอบเผาไฟมีลักษณะเป็นสีเทาไม่มีรอยแตกร้าว เนื้อภายในผสมผสานกันได้ดี หลังจากทดสอบเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 นาที ตัวอย่างคอนกรีตจะเริ่มสีเทาเข้มขึ้นพื้นผิวด้านนอกเริ่มมีรอยร้าวขนาดเล็กกระจายตัวเล็กน้อย เมื่อทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที พบว่าตัวอย่างคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสีเทาเข้าอย่างเห็นได้ชัดเจน และที่ 90 นาที พบว่าสีของคอนกรีตมีความเข้มขึ้นและลักษณะผิวมีรอยแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 15



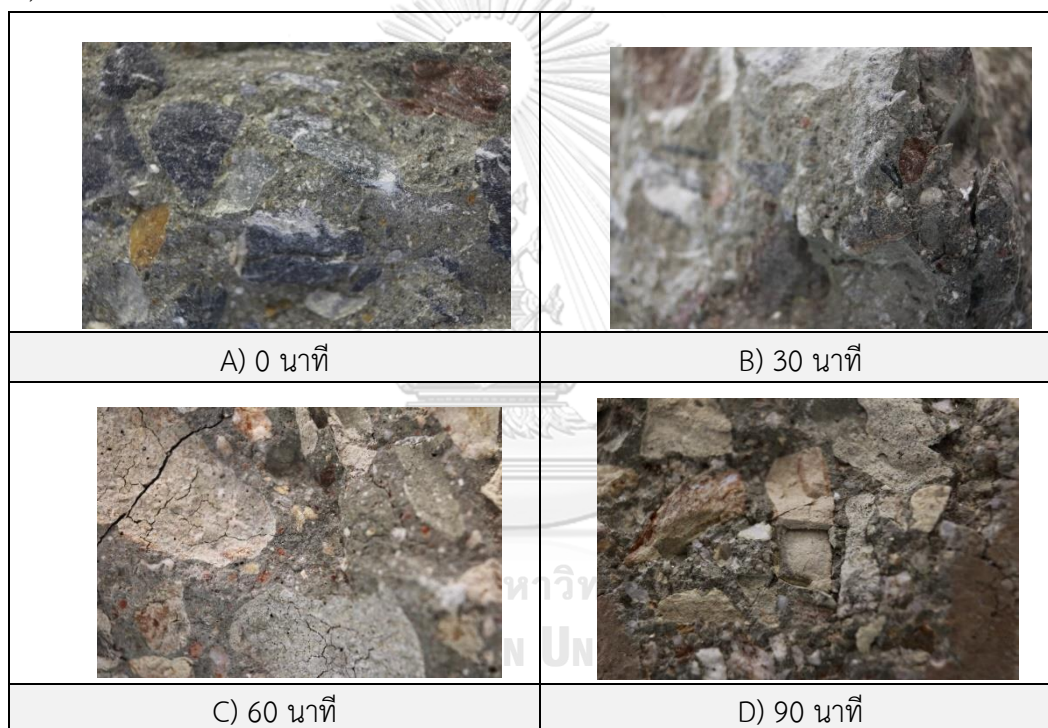
รูปที่ 14 ตัวอย่างคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟที่เวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที



รูปที่ 15 สภาพคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟที่เวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที

การเปลี่ยนแปลงของคอนกรีตที่สามารถสังเกตเห็นได้อีกอย่าง คือ รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนหลังการทดสอบเผาไฟเป็นเวลา 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งรอยแตกร้าวของคอนกรีตเกิดจากการขยายตัวของน้ำขณะที่ตัวอย่างอยู่ในอุณหภูมิที่สูง เมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีต

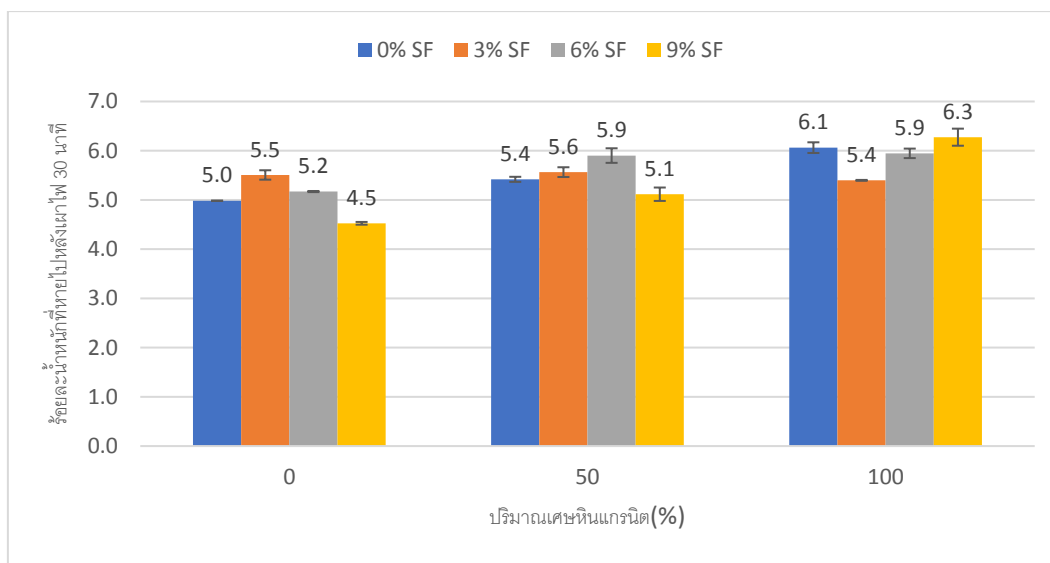
หลังจากการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที พบว่าตัวอย่างคอนกรีตเกิดการหลุดล่อนของเนื้อคอนกรีต (Spalling) ดังแสดงในรูปที่ 14 D) , 15 D) และ 16 D) ซึ่งเกิดจากความดันไอจากไอน้ำในโพรงของเนื้อคอนกรีตไม่สามารถถ่ายเทออกมาได้ขณะอยู่ในอุณหภูมิที่สูง ซึ่งก่อให้เกิดความเค้นดึง (Tensile stress) ภายในเนื้อคอนกรีต การหลุดล่อนจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นดึงที่เกิดจากความดันไอภายในโพรงของคอนกรีตเกินความต้านทานความเค้นดึงของผิวคอนกรีต (Sarker, Kelly, & Yao, 2014)



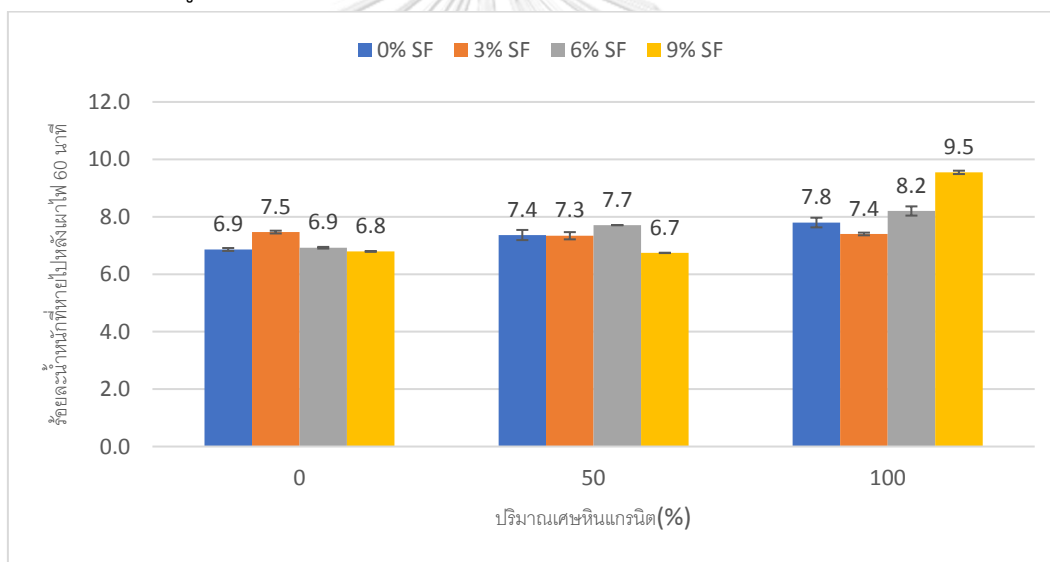
รูปที่ 16 ผิวของคอนกรีตหลังจากการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที

4.6.2 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ

จากผลทดสอบพบว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตที่ร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 5.0, 5.4 และ 6.1 ที่เวลาเผา 30 นาที ตามลำดับและ ที่เวลาเผา 60 นาที มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากัน 6.9, 7.4 และ 7.8 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตทั้งหมด มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปมากที่สุดดังรูปที่ 17 และ 18 เนื่องจากเศษแกรนิตสลายตัวง่ายกว่าทรายธรรมชาติภายใต้อุณหภูมิสูง (Hewlett & Liska, 2019)



รูปที่ 17 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 30 นาที

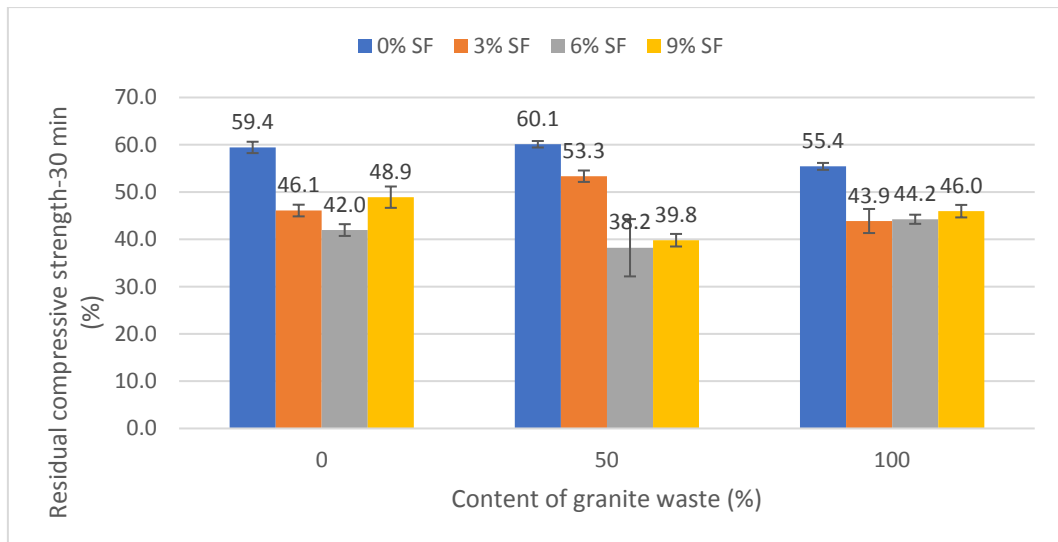


รูปที่ 18 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 60 นาที

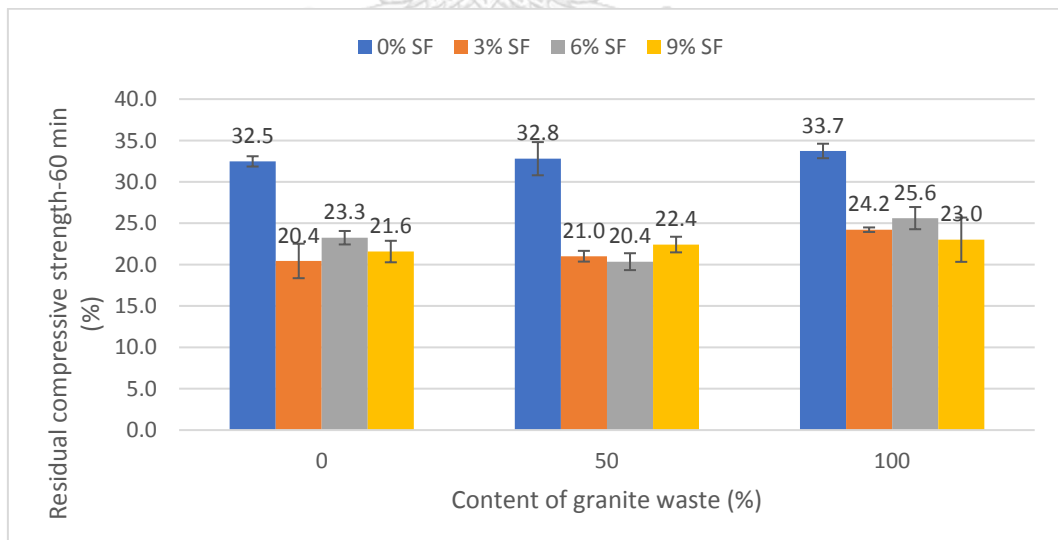
4.6.3 ร้อยละกำลังอัดค้ำของคอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่มวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีร้อยละของกำลังอัดที่ค้ำค้ำใกล้เคียงกันในส่วนผสมที่ไม่ผสมซิลิกาฟูมทั้งในระยะเวลาเผาไฟ 30 และ 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 19 และ 20 ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ร้อยละกำลังอัดที่ค้ำค้ำหลังจากการเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาทีที่มีค่าเท่ากับ 32.5, 32.8 และ 33.7 ตามลำดับ กำลังที่หายไปอยู่ที่ 66.3 - 67.2 และที่ 90 นาทีพบว่าร้อยละของน้ำหนักที่ค้ำค้ำเป็น 0 หรือตัวอย่างรับน้ำหนักไม่ได้เลย

เมื่อผสมซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ลงในแต่ละส่วนผสม กลับพบว่าร้อยละ 3, 6 และ 9 มีร้อยละของน้ำหนักที่คงค้างใกล้เคียงกันโดยร้อยละของน้ำหนักคงค้างของคอนกรีตมีค่าลดลงจากที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม ทั้งระยะเวลาการเผาไฟ 30, 60 และ 90 นาที เมื่อเทียบกับในแต่ละส่วนผสม



รูปที่ 19 ร้อยละน้ำหนักที่คงค้างหลังการทดสอบเผาไฟ 30 นาที



รูปที่ 20 ร้อยละน้ำหนักที่คงค้างหลังการทดสอบเผาไฟ 60 นาที

4.6.4 กำลังแรงอัดของคอนกรีตหลังเผาไฟ

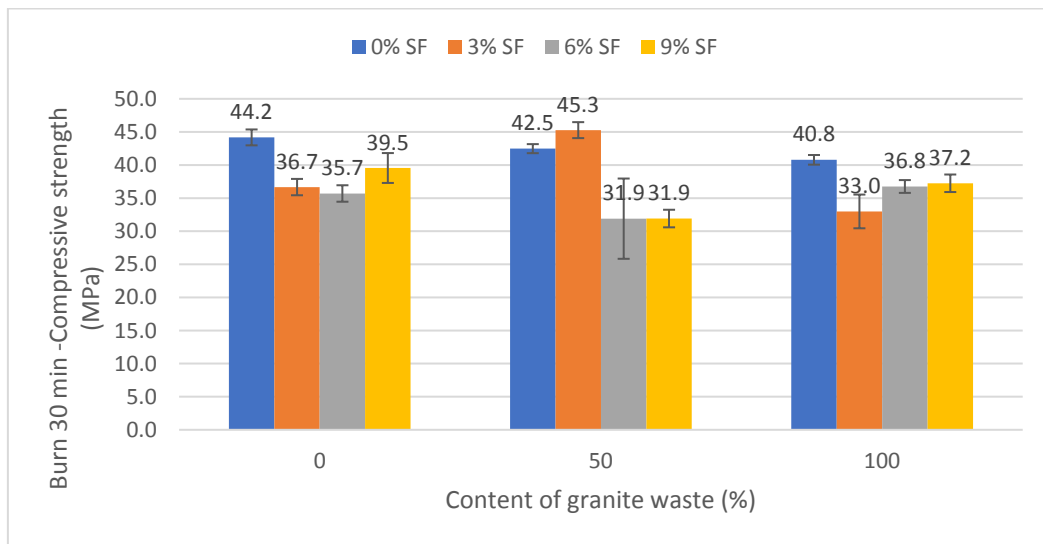
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังของหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที แสดงในตารางที่ 10 จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมากหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ยกตัวอย่างเช่นส่วนผสมที่เศษหินแกรนิตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (50GW-0) มีค่ากำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที เท่ากับ 67.48, 42.27 และ 23.18 MPa ตามลำดับ ซึ่งร้อยละกำลังรับแรงอัดคงค้างของคอนกรีตที่ส่วนผสม 50GW-0 หลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาทีเหลือเพียงแค่ร้อยละ 60.1 และ 32.8 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน แต่เมื่อเทียบที่ปริมาณเศษหินแกรนิตที่นำมาแทนที่ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก พบว่าที่มีค่ากำลังรับแรงอัดคงค้างไม่แตกต่างกันมาก โดยกำลังรับแรงอัดคงค้างที่ร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่ใช้เวลาเผา 30 นาที มีค่าเท่ากับ 44.2, 42.5 และ 40.8 ตามลำดับ และที่เวลาเผา 60 นาที มีค่าเท่ากับ 24.1, 23.2 และ 24.8 ตามลำดับ

ในขณะเดียวกันผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟของคอนกรีต กำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม ยกตัวอย่างเช่นส่วนผสม 50GP-0.5 และ 25GP-1.0 มีค่ากำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 นาทีเท่ากับ 10.3 และ 9.0 MPa ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bastami, Baghadrani, and Aslani (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างภายใต้การเผาไฟต่อคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟุ่ม พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมากเมื่อ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสกำลังคงค้างจะเหลือประมาณร้อยละ 25

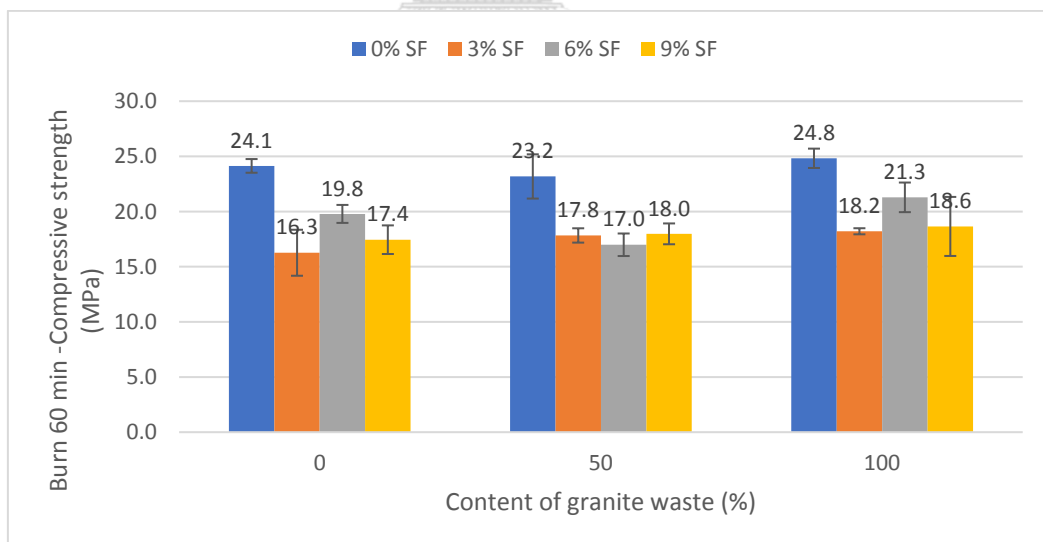
ตารางที่ 10 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 นาที

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังเผาไฟ (MPa)			
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที
0GW-0	65.1 ± 1.24	44.17 ± 1.20	24.14 ± 0.62	-
0GW-3	68.8 ± 4.44	36.67 ± 1.23	16.26 ± 2.08	-
0GW-6	78.6 ± 3.67	35.70 ± 1.24	19.78 ± 0.81	-
0GW-9	73.8 ± 4.23	39.55 ± 2.26	17.44 ± 1.29	-
50GW-0	67.48 ± 4.32	42.27 ± 0.68	23.18 ± 2.00	-
50GW-3	73.67 ± 3.42	45.27 ± 1.20	17.83 ± 0.64	-
50GW-6	74.43 ± 3.04	31.89 ± 0.60	16.98 ± 1.02	-
50GW-9	70.77 ± 2.65	31.91 ± 1.32	17.98 ± 0.94	-
100GW-0	66.40 ± 4.95	40.78 ± 0.73	24.83 ± 0.87	-
100GW-3	70.00 ± 7.46	32.99 ± 2.54	18.21 ± 0.27	-

100GW-6	75.64 ± 5.69	36.76 ± 0.97	21.29 ± 1.34	-
100GW-9	73.09 ± 5.53	37.24 ± 1.32	18.65 ± 2.67	-



รูปที่ 21 กำลังอัดคงค้างของคอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 30 นาที



รูปที่ 22 กำลังอัดคงค้างของคอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 60 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกล ความทนทานและความสามารถในการทำงานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตเหลือทิ้งจากโรงโม่หินที่นำกลับมาใช้ใหม่มาแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก และซิลิกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ เพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตและเปรียบเทียบผลการทดสอบกับคอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้มีการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ่มซึ่งประกอบไปด้วยความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตสด, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต, ปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำ และความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834 ผลการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาปริมาณทรายแกรนิตและซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสมเพื่อการประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อไป

จากผลการทดสอบพบว่าการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาตินั้นส่งผลให้ความสามารถในการทำงานมีแนวโน้มที่ลดลง และเมื่อผสมซิลิกาฟุ่มลงในส่วนผสมพบว่าค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสดมีค่าลดลงตามปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งในอายุ 7 วัน พบว่าส่วนผสมที่มีเศษหินแกรนิตมีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน โดยส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตล้วนมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ที่อายุ 7 วัน อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยหลังจากตัวอย่างมีอายุ 28 และ 90 วัน และการผสมซิลิกาฟุ่มส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตช่วยให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น แต่พบว่าการผสมซิลิกาฟุ่มที่มากเกินไปก็ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมากเท่าที่ควร โดยปริมาณซิลิกาฟุ่มที่คือ ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ให้ผลลัพธ์ในการรับกำลังอัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ส่วนโพรงและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตทั้งผสมซิลิกาฟุ่มและไม่ผสมซิลิกาฟุ่มได้ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญโดยตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่มจะมีค่าโพรงและการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม แต่ในทางตรงกันข้ามการผสมซิลิกาฟุ่มกลับส่งผลเชิงลบต่อความสามารถในการทนไฟของคอนกรีตทั้งกำลังรับน้ำหนักที่สูญเสียและกำลังรับแรงอัดคงค้างหลังการทดสอบเผาไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษหินแกรนิต

ส่วนในแง่ความคุ้มค่าของราคาวัสดุ โดยที่ทรายธรรมชาติมีราคาเท่ากับ 463 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนเศษหินแกรนิตมีราคาเท่ากับ 120 บาทต่อลูกบาศก์เมตรคิดจากราคา 80 บาทต่อตัน ซึ่งเศษหินแกรนิตมีราคาที่ถูกกว่าทรายธรรมชาติมาก ซึ่งการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติสามารถที่จะช่วยลดราคาต้นทุนของคอนกรีตให้มีราคาที่ลดลงเมื่อใช้เศษหินแกรนิตเป็นวัสดุผสมในส่วนผสม

ของคอนกรีต นอกจากช่วยลดราคาค่าวัสดุแล้วยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งเพราะเศษหินแกรนิตเป็นของเหลือใช้ที่ต้องกำจัดโดยการฝังกลบ ซึ่งถ้าเรานำเศษหินแกรนิตมาผสมคอนกรีตจะช่วยลดปัญหาจากการฝังกลบอีกด้วย

จากการทดสอบสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ่มพบว่าเศษหินแกรนิตสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้ โดยสามารถใช้แทนที่ทรายธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก แต่ถ้านำมาใช้ร่วมกับซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 6 ของน้ำหนักซีเมนต์แล้วจะให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดและคุ้มค่าที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้พบว่าเศษหินแกรนิตสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้ โดยสามารถใช้แทนที่ทรายธรรมชาติ โดยสมบัติทางกลต่าง ๆ ของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ่มที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติมีสมบัติทางกลที่คล้ายกันใช้ทรายธรรมชาติล้วนในคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ่ม ส่วนปริมาณซิลิกาฟุ่มควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีต ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาการใช้มวลรวมรีไซเคิลจากขยะเหลือทิ้งต่าง ๆ และนำมาใช้ร่วมกับซิลิกาฟุ่มในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อศึกษาปรับปรุงสมบัติและพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีตกำลังสูงซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบวัสดุ⁽¹⁾

ตารางที่ ก1 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ

การวิเคราะห์ขนาดทรายธรรมชาติด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง และทราย	น้ำหนัก ทรายที่ค้าง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง สะสม	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง
เบอร์	g	g	g	%	%	%
No.4	503.91	519.75	15.84	3.17	3.17	96.83
No.8	481.00	516.24	35.24	7.05	10.22	89.78
No.16	416.13	469.54	53.41	10.68	20.90	79.10
No.30	389.36	482.73	93.37	18.67	39.57	60.43
No.50	344.52	518.64	174.12	34.82	74.40	25.60
No.100	334.41	431.43	97.02	19.40	93.80	6.20
Pan	373.49	403.00	29.51	5.90	99.70	0.30
โมดูลัสความละเอียด					2.42	

ตารางที่ ก2 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติ

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
น้ำหนักถังทรงกระบอก (kg)	4.255
น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่น้ำจนเต็ม (kg)	10.03
น้ำหนักน้ำ (kg)	5.775
ปริมาตรถังทรงกระบอก (m ³)	0.00579
น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่ทรายธรรมชาติแห้งกระทุ้งแน่น (kg)	13.745
น้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg)	9.49
หน่วยน้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg/m ³)	1639.0

ตารางที่ ก3 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
ปริมาตรขวดรูปชมพู (cm ³)	500.00
น้ำหนักขวดรูปชมพู (g)	141.30
น้ำหนักขวดรูปชมพูที่เติมน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (g)	638.40
น้ำหนักขวดรูปชมพูที่เติมน้ำและทราย (g)	939.40
น้ำหนักทรายสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (g)	500.20
น้ำหนักทรายสภาวะอบแห้ง (g)	496.60
ความถ่วงจำเพาะของทรายสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.51
การดูดซึมน้ำของทราย (%)	0.72

ตารางที่ ก4 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษหินแกรนิต

การวิเคราะห์ขนาดทรายธรรมชาติด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง และทราย	น้ำหนัก ทรายที่ค้าง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง สะสม	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง
เบอร์	g	g	g	%	%	%
No.4	503.87	531.39	27.52	5.50	5.50	94.50
No.8	481.16	603.33	122.17	24.43	29.94	70.06
No.16	416.13	560.00	143.87	28.77	58.71	41.29
No.30	388.06	506.68	118.62	23.72	82.44	17.56
No.50	344.27	400.25	55.98	11.20	93.63	6.37
No.100	334.26	353.39	19.13	3.83	97.46	2.54
Pan	373.49	386.50	13.01	2.60	100.00	0.00
โมดูลัสความละเอียด					3.68	

ตารางที่ ก5 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเศษหินแกรนิต

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
น้ำหนักถังทรงกระบอก (kg)	4.201
น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่น้ำจนเต็ม (kg)	9.958
น้ำหนักน้ำ (kg)	5.757
ปริมาตรถังทรงกระบอก (m^3)	0.00577
น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่ทรายธรรมชาติแห้งกระทุ้งแน่น (kg)	13.395
น้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg)	9.194
หน่วยน้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg/m^3)	1593.0

ตารางที่ ก6 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของเศษหินแกรนิต

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
ปริมาตรขวดรูปชมพู่ (cm^3)	500.00
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ (g)	157.50
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (g)	657.18
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำและทราย (g)	963.46
น้ำหนักทรายสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (g)	500.13
น้ำหนักทรายสภาวะอบแห้ง (g)	495.84
ความถ่วงจำเพาะของทรายสภาวะอิมตัวผิวแห้ง	2.58
การดูดซึมน้ำของทราย (%)	0.87

ตารางที่ ก7 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์ขนาดทรายธรรมชาติด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง และทราย	น้ำหนัก ทรายที่ค้าง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง สะสม	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง
เบอร์	g	g	g	%	%	%
No.4	503.88	521.74	17.86	3.57	3.57	96.43
No.8	481.12	566.30	85.18	17.04	20.61	79.39
No.16	416.13	537.50	121.37	24.27	44.88	55.12
No.30	388.16	508.23	120.07	24.01	68.90	31.10
No.50	344.19	432.80	88.61	17.72	86.62	13.38
No.100	334.27	380.49	46.22	9.24	95.86	4.14
Pan	373.51	394.11	20.60	4.12	99.98	0.02
โมดูลัสความละเอียด					3.20	

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบของคอนกรีต

ตารางที่ ข1 ข้อมูลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต

ส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต (cm)			
	1	2	3	4
0GW	60	58	62	60
0GW-3	50	52	51	51.5
0GW-6	50	50	51	49
0GW-9	43	45	45	46
50GW	55	59	52	53
50GW-3	44	50	52	49
50GW-6	44	45	45	46
50GW-9	43	43	44	45
100GW	42	43	43	44
100GW-3	44	45	45	47
100GW-6	37	37	38	38
100GW-9	35	35	37	36

ตารางที่ ข2 ข้อมูลการทดสอบการรับแรงอัดของคอนกรีต

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)			ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3		
0GW	1	7	100.25	100.4	100	202.3	299.9
0GW	2	7	101	101.2	101	204.3	512.7
0GW	3	7	100.2	100.5	102	199.6	350.8
0GW	1	28	100.4	99	99.6	201.3	515.8
0GW	2	28	100.3	100.3	100.2	202	506.3
0GW	3	28	102.1	101.5	102.2	201.5	574.8
0GW	1	90	99.8	100.2	100	199.8	613.1
0GW	2	90	100.4	98.6	101	200.4	597.5
0GW	3	90	100.4	99.8	101.4	200.7	547
0GW-3	1	7	100.2	100.3	100.1	201	341.1
0GW-3	2	7	101.1	101.1	101	202	433.2
0GW-3	3	7	100.1	100.3	101	200	309.1
0GW-3	1	28	102	101.6	100	199	396
0GW-3	2	28	100	101.5	101.6	201.6	490.2
0GW-3	3	28	100	101.5	100.5	200.4	609.3
0GW-3	1	90	100.4	100.3	101	200.7	790
0GW-3	2	90	99.4	99.1	100.3	199.6	499.2
0GW-3	3	90	101	102	98.3	200	473.2
0GW-6	1	7	101	100.6	100	201.6	333.3
0GW-6	2	7	100	99.8	100.2	202.7	433.4
0GW-6	3	7	101.2	100	100.5	202.7	464
0GW-6	1	28	100.5	99.6	100.8	202	570.8
0GW-6	2	28	100.5	100.5	100.5	202.4	674.1
0GW-6	3	28	102	101.7	102.2	199.8	416.8
0GW-6	1	90	99.7	99.6	99.5	202.7	334.1

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)			ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3		
0GW-6	2	90	99.1	99.3	99.7	200.1	660.1
0GW-6	3	90	99.4	99	99.4	200.8	543.4
0GW-9	1	7	100	101.1	99.9	201.9	427.8
0GW-9	2	7	101	100.5	101	202	387
0GW-9	3	7	100.5	100	99.5	201.4	407.4
0GW-9	1	28	99.4	101.4	100.7	200	488.8
0GW-9	2	28	100	102	102.5	200.7	642.4
0GW-9	3	28	100	101	100.5	201	541.6
0GW-9	1	90	100.8	100.9	100.8	200.4	685.2
0GW-9	2	90	100.4	100.4	100.2	200.4	600.6
0GW-9	3	90	100.4	100.3	100	200.9	574.8
50GW	1	7	100	101.5	100.4	201.5	411
50GW	2	7	101.6	100.2	101.5	200	362
50GW	3	7	101.3	100.7	101.9	200.5	273
50GW	1	28	100	100.3	100.2	201.3	532
50GW	2	28	100.6	100.2	101.4	202	418.5
50GW	3	28	100.6	99	98.5	199.9	443
50GW	1	90	100.4	100.8	100.4	201.5	539.4
50GW	2	90	100.5	100.4	99.5	200	532.8
50GW	3	90	100.4	100.6	100	200.5	604.7
50GW-3	1	7	100.5	100.2	100.1	201.3	452.4
50GW-3	2	7	100.3	102	100	200	491.7
50GW-3	3	7	101.5	99.8	100.8	200.3	483
50GW-3	1	28	100.5	100	100	202.6	468
50GW-3	2	28	100	101.5	101	202.1	541.1
50GW-3	3	28	99.9	102.4	102	201.4	643.6
50GW-3	1	90	101.5	100.3	100	200.1	597.5

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)			ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3		
50GW-3	2	90	100.4	102.7	98.3	200.3	750.1
50GW-3	3	90	100.6	100.4	99.4	200.4	536.3
50GW-6	1	7	101.8	101.4	101	201.1	613.1
50GW-6	2	7	100.5	100.5	99.9	199.3	484.1
50GW-6	3	7	100.6	100	101	199.8	567.1
50GW-6	1	28	99.2	100.4	99.7	201.9	482.5
50GW-6	2	28	99.4	101.9	102.2	201.4	411.4
50GW-6	3	28	100.5	100.8	100.5	202.5	591.9
50GW-6	1	90	99.6	99.8	100.5	200.4	715.6
50GW-6	2	90	99.2	99.9	99.6	202.4	653
50GW-6	3	90	100.5	100	99.6	200.4	653.2
50GW-9	1	7	102.1	100.4	101.2	200	356.3
50GW-9	2	7	101.4	101.8	101.3	200.9	572.3
50GW-9	3	7	100	100.2	101.2	199	458.7
50GW-9	1	28	99.3	100	99.9	200	553.1
50GW-9	2	28	99.7	100.5	100.5	201	476.1
50GW-9	3	28	99.2	101.1	101.2	200.7	488.7
50GW-9	1	90	99.7	100.5	100.2	199.4	685.7
50GW-9	2	90	100.8	101.8	99.9	201.8	585.6
50GW-9	3	90	100	100.8	99	200.7	741.4
100GW	1	7	101	100.8	101	201.9	410.6
100GW	2	7	101.4	101.7	101.7	201.6	495.9
100GW	3	7	100.4	101.3	99.7	201	418.7
100GW	1	28	101.3	102	102	203.1	433.2
100GW	2	28	102.4	102.5	102.6	201.3	488.2
100GW	3	28	100	102.5	100.4	200.5	590
100GW	1	90	101.4	102	100.1	201.6	568.9

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)			ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3		
100GW	2	90	101.3	101.7	102.6	201.9	698.1
100GW	3	90	100.7	99.3	100	200.7	600.5
100GW-3	1	7	101.1	101.4	99.9	201.3	441.6
100GW-3	2	7	101.1	100.7	100.5	199.7	335.2
100GW-3	3	7	100	101.7	101.3	200	486.6
100GW-3	1	28	101	100.2	101	201.4	455
100GW-3	2	28	99.7	100.1	101.4	201	322
100GW-3	3	28	100.9	100.3	101.4	201.3	663
100GW-3	1	90	99.9	98.4	98	199.7	548.5
100GW-3	2	90	100.3	98.3	98.4	199.7	526.1
100GW-3	3	90	98.7	100.4	97.5	200	658.2
100GW-6	1	7	102.2	101	101.7	200.6	472.4
100GW-6	2	7	100.7	100.8	100.5	202	417.5
100GW-6	3	7	101.5	100	101.1	202.1	452.2
100GW-6	1	28	100.5	102.1	100.6	200.4	610.3
100GW-6	2	28	101.5	100.3	101.4	201.7	548.6
100GW-6	3	28	99.4	98.5	100.5	201.1	378
100GW-6	1	90	100.4	102.7	100.7	200.3	693
100GW-6	2	90	100.8	98.7	101.5	200.7	576.4
100GW-6	3	90	100.1	100	100.8	201.8	633.7
100GW-9	1	7	100.9	100.8	100	200.5	752.3
100GW-9	2	7	99	101.8	100	200.9	435.2
100GW-9	3	7	100.5	101.4	100.3	201.6	653.9
100GW-9	1	28	100.3	100.3	100.4	201.8	601.7
100GW-9	2	28	100.7	101.3	100.9	201.5	715.1
100GW-9	3	28	100.3	100.2	99.8	200.4	448
100GW-9	1	90	100.5	100.1	99.8	200.4	638.2

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)			ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3		
100GW-9	2	90	100.1	100.2	100.4	200	624.2
100GW-9	3	90	100.2	100.3	99.4	201.8	652.1

ตารางที่ ข3 ข้อมูลทดสอบกำลังรับแรงดัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ความยาวด้านของตัวอย่าง (mm)			แรงดัดครั้งแรก (kN)
		กว้าง	ลึก	ยาว	
0GW	1	100	100	350	32.3
0GW	2	100	100	350	25.3
0GW	3	100	100	350	22.5
0GW-3	1	100	100	350	32.3
0GW-3	2	100	100	350	20.5
0GW-3	3	100	100	350	26.8
0GW-6	1	100	100	350	22.9
0GW-6	2	100	100	350	27.2
0GW-6	3	100	100	350	25.3
0GW-9	1	100	100	350	20.1
0GW-9	2	100	100	350	32.6
0GW-9	3	100	100	350	28.3
50GW	1	100	100	350	27.1
50GW	2	100	100	350	28.1
50GW	3	100	100	350	25
50GW-3	1	100	100	350	27.8
50GW-3	2	100	100	350	25.3
50GW-3	3	100	100	350	25.1
50GW-6	1	100	100	350	23.9
50GW-6	2	100	100	350	24.3
50GW-6	3	100	100	350	26.8

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ความยาวด้านของตัวอย่าง (mm)			แรงตัดครั้ง แรก (kN)
		กว้าง	ลึก	ยาว	
50GW-9	1	100	100	350	25.7
50GW-9	2	100	100	350	24
50GW-9	3	100	100	350	28
100GW	1	100	100	350	30.7
100GW	2	100	100	350	39.3
100GW	3	100	100	350	26.9
100GW-3	1	100	100	350	26.2
100GW-3	2	100	100	350	32.5
100GW-3	3	100	100	350	31.2
100GW-6	1	100	100	350	26.6
100GW-6	2	100	100	350	32.1
100GW-6	3	100	100	350	32
100GW-9	1	100	100	350	30.7
100GW-9	2	100	100	350	30.8
100GW-9	3	100	100	350	26.1

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	น้ำหนัก ก่อนอบ (kg)	น้ำหนักหลัง อบในอากาศ (kg)	น้ำหนักผิว แห้งหลัง แช่น้ำ (kg)	น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน อากาศหลัง แช่น้ำและต้ม (kg)	น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน น้ำหลังแช่ น้ำและต้ม (kg)
0GW	1	3.0178	2.9759	3.0274	3.0280	1.8306
0GW	2	3.4475	3.4035	3.4596	3.4609	2.0899
0GW	3	4.0382	3.9854	4.0503	4.0515	2.4334
0GW-3	1	3.8572	3.8298	3.8682	3.8687	2.3141
0GW-3	2	4.3645	4.3306	4.3746	4.3751	2.6182
0GW-3	3	3.1289	3.0936	3.1364	3.1368	1.8719
0GW-6	1	4.5003	4.4695	4.5099	4.5116	2.6932
0GW-6	2	3.2531	3.2271	3.2583	3.2591	1.9438
0GW-6	3	3.8923	3.8589	3.8990	3.9001	2.3113
0GW-9	1	3.7113	3.6848	3.7216	3.7218	2.2059
0GW-9	2	4.2760	4.2465	4.2870	4.2878	2.5668
0GW-9	3	3.0527	3.0312	3.0598	3.0605	1.8338
50GW	1	3.6018	3.5459	3.6162	3.6172	2.1837
50GW	2	3.7839	3.7289	3.7937	3.7959	2.2977
50GW	3	3.6229	3.5669	3.6352	3.6363	2.1971
50GW-3	1	4.2757	4.2287	4.2752	4.2758	2.5792
50GW-3	2	3.9458	3.8909	3.9455	3.9464	2.3780
50GW-3	3	4.3152	4.2627	4.3192	4.3198	2.6089
50GW-6	1	3.9730	3.9283	3.9765	3.9770	2.4029
50GW-6	2	4.4415	4.3950	4.4420	4.4430	2.6842
50GW-6	3	3.2265	3.1868	3.2264	3.2270	1.9482
50GW-9	1	3.4908	3.4515	3.4961	3.4962	2.1107
50GW-9	2	4.0672	4.0309	4.0713	4.0710	2.4584
50GW-9	3	3.7863	3.7472	3.7906	3.7910	2.2848
100GW	1	3.0023	2.9608	3.0138	3.014	1.8305

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	น้ำหนัก ก่อนอบ (kg)	น้ำหนักหลัง อบในอากาศ (kg)	น้ำหนักผิว แห้งหลัง แช่น้ำ (kg)	น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน อากาศหลัง แช่น้ำและต้ม (kg)	น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน น้ำหลังแช่ น้ำและต้ม (kg)
100GW	2	3.6491	3.6002	3.6606	3.6608	2.2231
100GW	3	3.8211	3.7677	3.8329	3.8338	2.3258
100GW-3	1	3.5460	3.5020	3.5475	3.5498	2.1481
100GW-3	2	4.0230	3.9688	4.0234	4.0256	2.4242
100GW-3	3	3.8082	3.7555	3.8091	3.8112	2.3009
100GW-6	1	3.6580	3.6134	3.6564	3.6574	2.2160
100GW-6	2	4.0325	3.9893	4.0333	4.0341	2.4415
100GW-6	3	3.3759	3.3398	3.3750	3.3756	2.0468
100GW-9	1	3.9904	3.9505	3.9954	3.9949	2.4194
100GW-9	2	4.3201	4.2820	4.3239	4.3229	2.6158
100GW-9	3	4.0531	4.0108	4.0569	4.0554	2.4567

ตารางที่ ข5 ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักที่หายไปหลังเผาไฟของคอนกรีต

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	น้ำหนักก่อนเผาไฟ (kg)	น้ำหนักหลังเผาไฟ (kg)
0GW	1	30	4.01	3.805033
0GW	2	30	4.021	3.830532
0GW	3	30	3.997	3.793071
0GW-3	1	30	4.013	3.774193
0GW-3	2	30	3.989	3.76933
0GW-3	3	30	4.025	3.798819
0GW-6	1	30	4.025	3.800227
0GW-6	2	30	3.947	3.741375
0GW-6	3	30	4.015	3.807415
0GW-9	1	30	3.997	3.815507

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาทีก)	น้ำหนักก่อนเผาไฟ (kg)	น้ำหนักหลังเผาไฟ (kg)
0GW-9	2	30	3.971	3.787376
0GW-9	3	30	3.989	3.809108
50GW	1	30	3.995	3.774971
50GW	2	30	4.027	3.812405
50GW	3	30	3.985	3.761352
50GW-3	1	30	3.995	3.765483
50GW-3	2	30	3.968	3.756332
50GW-3	3	30	4.075	3.846198
50GW-6	1	30	4.1	3.87832
50GW-6	2	30	3.987	3.751722
50GW-6	3	30	3.974	3.738772
50GW-9	1	30	3.98	3.786593
50GW-9	2	30	3.975	3.769961
50GW-9	3	30	3.998	3.784901
100GW	1	30	4.055	3.814405
100GW	2	30	3.896	3.672682
100GW	3	30	4.011	3.762685
100GW-3	1	30	3.969	3.755389
100GW-3	2	30	4.056	3.845878
100GW-3	3	30	3.988	3.772122
100GW-6	1	30	3.984	3.747102
100GW-6	2	30	3.954	3.730325
100GW-6	3	30	4	3.757862
100GW-9	1	30	4.07	3.827788
100GW-9	2	30	3.955	3.706835
100GW-9	3	30	3.994	3.732339
0GW	1	60	4.016	3.74266
0GW	2	60	4.053	3.777502

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาทีก)	น้ำหนักก่อนเผาไฟ (kg)	น้ำหนักหลังเผาไฟ (kg)
0GW	3	60	3.997	3.717895
0GW-3	1	60	3.987	3.688618
0GW-3	2	60	3.998	3.699415
0GW-3	3	60	3.985	3.693415
0GW-6	1	60	4.022	3.739938
0GW-6	2	60	4.009	3.727397
0GW-6	3	60	3.958	3.683985
0GW-9	1	60	3.988	3.718063
0GW-9	2	60	3.995	3.724439
0GW-9	3	60	3.968	3.697383
50GW	1	60	3.985	3.679248
50GW	2	60	3.97	3.689753
50GW	3	60	3.955	3.67076
50GW-3	1	60	4.05	3.762032
50GW-3	2	60	3.997	3.706086
50GW-3	3	60	4.03	3.72239
50GW-6	1	60	3.978	3.679051
50GW-6	2	60	4.04	3.728507
50GW-6	3	60	3.959	3.661845
50GW-9	1	60	3.994	3.71726
50GW-9	2	60	4.014	3.757388
50GW-9	3	60	3.987	3.711565
100GW	1	60	3.988	3.676535
100GW	2	60	4.099	3.753977
100GW	3	60	4.152	3.828538
100GW-3	1	60	3.897	3.611706
100GW-3	2	60	3.956	3.65865
100GW-3	3	60	4.012	3.711796

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาทีก)	น้ำหนักก่อนเผาไฟ (kg)	น้ำหนักหลังเผาไฟ (kg)
100GW-6	1	60	3.985	3.658105
100GW-6	2	60	4.04	3.721729
100GW-6	3	60	4.005	3.70369
100GW-9	1	60	3.998	3.67755
100GW-9	2	60	3.854	3.486047
100GW-9	3	60	4.075	3.740127

ตารางที่ ข6 ข้อมูลทดสอบกำลังรับแรงอัดค้ำหลังเผาไฟของคอนกรีต

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผา ไฟ (นาทีก)	ขนาดหน้าตัด (mm)			แรงอัดหลังเผาไฟ (kN)
			1	2	3	
0GW	1	30	100.6	100.5	99.1	387.6
0GW	2	30	100.1	99.9	100.4	348
0GW	3	30	99	100.2	98.9	364.2
0GW-3	1	30	100.4	100.5	100.5	290.8
0GW-3	2	30	99	99.8	98.3	326.4
0GW-3	3	30	100.1	100.5	101.3	371.1
0GW-6	1	30	100.5	100.8	100.5	325.8
0GW-6	2	30	99.9	99.9	99.6	301.9
0GW-6	3	30	100	101	101.5	285.2
0GW-9	1	30	99.7	100.6	100.7	366.8
0GW-9	2	30	99.7	99.5	99.8	380.7
0GW-9	3	30	99.8	99.4	101.5	312.2
50GW	1	30	100.4	99	99.6	325.9
50GW	2	30	100.3	100.3	100.2	348.7
50GW	3	30	100.4	101.3	99.7	329.3
50GW-3	1	30	100.4	101.3	100.4	396
50GW-3	2	30	100.9	100.3	101.4	361.6
50GW-3	3	30	100.8	100.7	98.5	356
50GW-6	1	30	101.2	100	100.4	309.9
50GW-6	2	30	100.5	100.5	100.6	314.6

ส่วนผสม	หมายเลขตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	ขนาดหน้าตัด (mm)			แรงอัดหลังเผาไฟ (kN)
			1	2	3	
50GW-6	3	30	101.8	99.8	101.7	136.9
50GW-9	1	30	100.6	100.3	100.3	310
50GW-9	2	30	101.4	100.7	101.5	177.6
50GW-9	3	30	99.8	99.7	101.5	273.2
100GW	1	30	100	100.4	100	0
100GW	2	30	101.5	101.2	101	338.6
100GW	3	30	99.8	98.9	101.2	310.3
100GW-3	1	30	99.3	101.2	98.75	287.3
100GW-3	2	30	100.4	102	99.3	232.3
100GW-3	3	30	101.8	102.5	100.3	321.7
100GW-6	1	30	101.2	100.6	99.7	318.3
100GW-6	2	30	101.8	100.9	101.3	0
100GW-6	3	30	101.5	99.7	100.5	292.1
100GW-9	1	30	100.5	99.8	100	252.7
100GW-9	2	30	100.9	99.6	101	336.4
100GW-9	3	30	100.9	101.5	101.2	221.4
0GW	1	60	102	100.7	100.9	187.5
0GW	2	60	103	102	101	182.9
0GW	3	60	99.7	100.6	100.7	197.5
0GW-3	1	60	100.7	100	101.7	0
0GW-3	2	60	100	100.3	100.2	71.3
0GW-3	3	60	100.2	100.4	100	128.3
0GW-6	1	60	101.4	102	102	173.6
0GW-6	2	60	99.7	102.2	99.4	156.8
0GW-6	3	60	100.5	101.3	100.3	185.1
0GW-9	1	60	100.5	100.1	100.7	156.1
0GW-9	2	60	100.4	101.3	100.4	195.8
0GW-9	3	60	100.9	100.3	101.4	121.5
50GW	1	60	101	101.2	99.8	173.1
50GW	2	60	100.5	101.4	100.3	164.4
50GW	3	60	100.3	100.3	100.4	128.5
50GW-3	1	60	101.5	100.4	100.5	145.8
50GW-3	2	60	99.8	100.4	101.4	138.2

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผา ไฟ (นาทีก)	ขนาดหน้าตัด (mm)			แรงอัดหลังเผาไฟ (kN)
			1	2	3	
50GW-3	3	60	100.25	100.4	100	158.6
50GW-6	1	60	101	100.7	100.3	129.8
50GW-6	2	60	100.5	99.8	100.7	139.8
50GW-6	3	60	100.3	99.6	100.7	162.1
50GW-9	1	60	100.5	101.5	101.6	169.8
50GW-9	2	60	100.9	102.3	101.2	184
50GW-9	3	60	101.2	100.6	100.4	200
100GW	1	60	99.7	100.5	100.7	198.5
100GW	2	60	99.2	101.1	101.8	195.5
100GW	3	60	101	100	102	173.5
100GW-3	1	60	99.7	102	100.3	145
100GW-3	2	60	101.5	99.8	100.4	72.2
100GW-3	3	60	100.8	98.9	101	64.2
100GW-6	1	60	102	99.3	100.3	161.2
100GW-6	2	60	99.8	100.4	100.4	175.7
100GW-6	3	60	98.9	101.8	101	205.9
100GW-9	1	60	100.5	98.5	99.7	143.3
100GW-9	2	60	100.8	100.1	101.8	70.6
100GW-9	3	60	100.5	100.3	102	151.3

ภาคผนวก ค
รูปภาพประกอบงานวิจัย



รูปที่ ค1 ทรายธรรมชาติ



รูปที่ ค2 เศษหินแกรนิต



รูปที่ ค3 ทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ ค4 ทดสอบกำลังดึงแยกของคอนกรีต



รูปที่ ค5 ทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต



รูปที่ ค6 ทดสอบการทดสอบความทนทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้

บรรณานุกรม

- ธัญวัฒน์ โปธิศิริ. (2556). *การออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยด้านอัคคีภัย*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1 - 2547*. กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง.
- Abd Elmoaty, A. E. M. (2013). Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. *Construction Building Materials*, 47, 743-752. doi:0.1016/j.conbuildmat.2013.05.054
- Arivumangai, A., & Felixkala, T. (2014). Strength and durability properties of granite powder concrete. *Journal of Civil Engineering Research*, 4(2A), 1-6.
- Arulraj, G. P., Adin, A., & Kannan, T. S. (2013). Granite powder concrete. *IRACST-Engineering Science Technology: An International Journal*, 3(1), 193.
- ASTM-C33. (2003). American society for testing and materials. In *Standard specification for concrete aggregates*.
- ASTM-C39. (2018). American society for testing and materials. In *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*.
- ASTM-C127. (2007). American society for testing and materials. In *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*.
- ASTM-C128. (2001). American society for testing and materials. In *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate*.
- ASTM-C131. (2014). American society for testing and materials. In *Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine 1*.
- ASTM-C642. (2013). American society for testing and materials. In *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*.
- ASTM-C1609. (2010). *American society for testing and materials*.
- ASTM-C1611. (2005). American society for testing and materials. In *Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete*.

- ASTM A. (2011). C496/C496M-17, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens ASTM C-496. *West Conshohocken: ASTM International*.
- ASTM C. (1993). *136/C136 M-19. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Easton: ASTM.
- Babafemi, A. J., & Olawuyi, B. J. (2011). *Effect of Replacement of Sand With Granite Fines on the Compressive and Tensile Strengths of Palm Kernel Shell Concrete (PKSC)*.
- Babu, K. G., & Prakash, P. V. S. (1995). Efficiency of silica fume in concrete, cement and concrete research.
- Bastami, M., Baghbadrani, M., & Aslani, F. (2014). Performance of nano-Silica modified high strength concrete at elevated temperatures. *Construction Building Materials, 68*, 402-408.
- Bhikshma, V., Nitturkar, K., & Venkatesham, Y. (2009). Investigations on mechanical properties of high strength silica fume concrete.
- Donza, H., Cabrera, O., & Irassar, E. F. (2002). High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement Concrete Research, 32*(11), 1755-1761.
- Falade, F. (1999). Effects of separation of grain sizes of fine aggregate on properties of concrete containing granite fines.
- Hewlett, P., & Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- ISO-834. (1999). British Standard Institute. In *Part 1 element of building construction: general requirements for fire resistance testing*.
- Kala, F. T. (2013). Properties of granite powder concrete. Retrieved from <https://publikasiilmiah.ums.ac.id/bitstream/handle/11617/4881/40%20hal%202076-283.pdf?sequence=1>
- Khan, M. I., & Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation Recycling, 57*, 30-35.
- Khine, M. T. (2018). *The influences of granite particle as a mixing material of high-strength concrete*. (Master's thesis), Chulalongkorn University, Bangkok.
- Manasseh, J. (2010). Use of crushed granite fine as replacement to river sand in

- concrete production. *Leonardo Electronics Journal of Practice Technologies*, 17, 85-96.
- Mazloom, M. S., Ramezaniapour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement Concrete Composites*, 26(4), 347-357.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (Vol. 5). London: Longman.
- Raghavendra, R., Sharada, S. A. G., & Ravindra, M. V. (2015). Compressive strength of high performance concrete using granite powder as fine aggregate. *International Journal of Research in Engineering and Technology*(4), 47-49.
- Shannag, M. J. (2000). High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cement Concrete Composites*, 22(6), 399-406.
- Singh, S., Khan, S., Khandelwal, R., Chugh, A., & Nagar, R. (2016). Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. *Journal of Cleaner Production*, 119, 86-98.
- Singh, S., Nagar, R., & Agrawal, V. (2016). Feasibility as a potential substitute for natural sand: a comparative study between granite cutting waste and marble slurry. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 571-582.
- Vijayalakshmi, M., & Sekar, A. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and building materials*, 46, 1-7.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศุภากร อังกินันท์
วัน เดือน ปี เกิด	8 สิงหาคม 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพ ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	11 ซอยคู້บอน 35 แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กทม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY