การพัฒนาอิฐดินประสานโดยใช้เศษแก้ว

ปกรณ์ นิคม

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการงานก่อสร้าง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มิถุนายน 2560
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบงานนิพนธ์ ได้พิจารณางานนิพนธ์ของ ปกรณ์ นิคม ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการงานก่อสร้าง ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)

คณะกรรมการสอบงานนิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)

..... กรรมการ
(ดร. เที่ยง ชีวะเกตุ)

..... กรรมการ
(ดร. อมรชัย ใจยงค์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการงานก่อสร้าง ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)
วันที่ 12 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาการค้นคว้าอิสระครั้งนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน

ขอขอบคุณ ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ และ ดร.อมรชัย ใจยงค์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ตรวจแก้ไขและวิจารณ์ผลงานทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ

ขอขอบคุณคณาจารย์ผู้สอนในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการงานก่อสร้าง ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาอันมีคุณค่ายิ่งและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ได้ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ที่สำคัญคือ กำลังใจในการฝ่าฟันอุปสรรคต่าง ๆ ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

ปกรณ์ นิคม

54921336: สาขาวิชา: เทคโนโลยีวิศวกรรม; วศ.ม. (เทคโนโลยีวิศวกรรม)
คำสำคัญ: อิฐดินประสาน, พัฒนาผิวอิฐ, เศษแก้ว

ปกรณ์ นิคม: การพัฒนาอิฐดินประสานโดยใช้เศษแก้ว (DEVELOPMENT OF THE LATERITE BRICKS BY FRAGMENTS OF BROKEN GLASS USAGE) คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: วิเชียร ชาลี, Ph.D. 76 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

วัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าอิสระในครั้งนี้ คือ การเพิ่มมูลค่าของอิฐดินประสานโดยการพัฒนาผิวของอิฐให้มีความสวยงามขึ้น ด้วยการใช้เศษแก้วเป็นส่วนผสมแทนที่ทรายละเอียดในการผลิตอิฐ ซึ่งเศษแก้วจะทำให้ผิวอิฐมีลวดลายและมีความแวววาวเกิดขึ้น และอิฐดินประสานที่ได้จะต้องมีสมบัติผ่านมาตราฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนบล็อกประสาร มผช 620/ 2547 ซึ่งจะต้องมีค่ากำลังอัดสำหรับชนิดรับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำตัวอย่างอิฐดินประสานขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตรและแบ่งเป็นส่วนผสมทีแตกต่างกัน 3 กลุ่ม ซึ่งมีอัตราส่วนของ เศษแก้ว:ดินลูกรัง:ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 45 : 45 : 10, 55 : 35 : 10, และ 65 : 25 : 10 โดยน้ำหนักในแต่ละกลุ่มส่วนผสมจะมี 12 ตัวอย่าง โดยการเปลี่ยนขนาดของเศษแก้ว 4 ขนาดจาการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4, 8, 10, และ 16 และใช้เวลาในการบ่มอิฐที่แตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือ 7, 14, และ 28 วัน นอกจากนี้ยังได้ใช้อิฐดินประสานที่ไม่ผสมเศษแก้วเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบ โดยแบ่งเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกันสามกลุ่มเช่นกัน ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของ ทรายละเอียด : ดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 45 : 45 : 10, 55 : 35 : 10 และ 65 : 25 : 10 โดยน้ำหนักในแต่ละกลุ่มส่วนผสมจะมี 3 ตัวอย่าง โดยใช้เวลาบ่มอิฐที่แตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือ 7, 14, และ28 วัน

จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดของอิฐดินประสานที่ผสมเศษแก้วมีค่าลดลงตามขนาดเศษแก้วที่ใหญ่ขึ้น และกำลังอัดของอิฐจะลดลงหากเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเศษแก้ว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากผิวของเศษแก้วเรียบและลื่น ทำให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะของอนุภาคปูนซีเมนต์ไม่ดีเท่ากับทรายละเอียด และส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตอิฐดินประสานในการศึกษานี้ คือ อัตตราส่วนของ เศษแก้ว : ดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 55 : 35 : 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้เศษแก้วที่ค้างตะแกรงเบอร์ 8 เป็นส่วนผสม ซึ่งจะได้ลักษณะผิวที่สวยงามจากเศษแก้วและมีกำลังอัดสูงกว่ามาตราฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนบล็อกประสาน มผช 620/2547

54921336: MAJOR: ENGINEERING TECHNOLOGY; M.Eng.
(ENGINEERING TECHNOLOGY)
KEYWORD: LATERITE BRICKS, SURFACE DEVELOPMENT, BROKEN GLASS
PAKORN NIKHOM: DEVELOPMENT OF THE LATERITE BRICKS BY FRAGMENTS OF BROKEN GLASS USAGE. ADVISORY COMMITTEE: WICHIAN CHALEE, Ph.D. 76 P. 2017.

The purpose of this study was to develop the surface of Laterite bricks for increase value of product by using the fragment of broken glass in the mixtures instead of sand, the broken glasses shall create the pattern and glitter on the brick surface, the appropriate mixtures shall comply to Thai Community Product Standard 602/2547, which shall have the compressive strength at least 70 ksc.

The samples were molded to dimension 5x5x5 cm in 3 groups of mixtures, the mixtures percent by weight of broken glasses: laterite soil: cement are 45:45:10, 55:35:10 and 65:25:10. Each group of mixtures consisted of 12 samples from 4 different sizes of broken glasses sifted through the sieve no.4, 8, 10 and 16 and from 3 different curing times 7, 14 and 28 days. The controlled samples (without broken glasses mixture) ware in 3 groups of mixtures also, the percent by weight of sand: laterite soil: cement are 45:45:10, 55:35:10 and 65:25:10, each group of mixtures consisted of 3 samples from 3 different curing times 7, 14 and 28 days.

The results indicated that the strength of samples decrease when apply the broken glasses in the mixtures, the more quantity of broken glasses in the mixture the less strength and also the larger size of broken glasses in the mixture the less strength in the bricks. The surface of glasses smooth and slippery which affect to have less bonding in the sample. In this study, the appropriate percent by weight for mixture of broken glasses: laterite soil: cement was 55:35:10 with broken glasses shifted through the sieve no. 8, this mixture created the most beautiful surface and strength meet the requirement.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่ออังกฤษ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

สมมติฐานของการวิจัย 2

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 2

ขอบเขตของการวิจัย 3

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

คอนกรีต 4

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4

สมบัติของปูนซีเมนต์ 5

มวลรวม 12

การบ่มคอนกรีต 13

การยึดเกาะและการแยกตัวของคอนกรีต 15

การเยิ้มของคอนกรีต 16

การจี้คอนกรีต 17

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 17

การผลิตคอนกรีตบล็อก 18

การผลิตคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม 18

การผลิตอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต 19

การผลิตอิฐมวลเบาอบไอน้ำแรงดันสูง 20

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	ทฤษฎีและขั้นตอนการผลิตอิฐดินประสาน	21
	ดิน	24
	โครงสร้างของดิน	25
	ขนาดของเม็ดดิน	26
	ศิลาแลง	28
	ดินลูกรัง	28
	มาตรฐานสำหรับอิฐดินประสาน	29
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	35
	การเตรียมตัวอย่างดินลูกรัง	35
	การเตรียมตัวอย่างเศษแก้ว	37
	การหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรัง	38
	การหาค่า OPTIMUM MOISTURE CONTENT	40
	ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	43
	การทดสอบกำลังอัดอิฐดินประสาน	45
	การออกแบบส่วนผสม	46
	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	48
	การทดสอบกำลังอัดอิฐ	52
	การทดสอบความหนาแน่นแห้ง	54
4	ผลการวิจัย	55
	สมบัติทางกายภาพดินลูกรัง	55
	สมบัติเชิงกลของอิฐดินประสานที่ไม่ผสมเศษแก้ว	55
	สมบัติเชิงกลของอิฐดินประสานที่ผสมเศษแก้ว	58
	เปรียบเทียบกำลังอัดของอิฐที่ผสมเศษแก้วและไม่ผสมเศษแก้ว	62
	ลักษณะการชำรุดแตกหักของแท่งอิฐ	64
	ความหนาแน่นแห้งอิฐ	65
	ลักษณะกายภาพอิฐที่ผสมเศษแก้วขนาดต่าง ๆ	67

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	69
	สรุปผลการศึกษา	69
	ข้อเสนอแนะ	70
บรรณานุกรม		71
ประวัติย่อของผู้วิจัย		76

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80	11
2-2	ขนาดของดินที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นอิฐดินประสาน	22
2-3	ขนาดของดินที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นอิฐดินประสาน	22
2-4	การแบ่งขนาดของเม็ดดิน	27
3-1	พลังงานที่ใช้ในการบดอัดโดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) และการบดอัดโดยใช้ Mini Compactor	44
3-2	อัตราส่วนผสมในการผลิตอิฐดินประสานเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ	47
3-3	อัตราส่วนผสมในการผลิตอิฐดินประสาน	48
4-1	ค่ากำลังอัดของอิฐที่ไม่ผสมเศษแก้ว	57
4-2	ค่ากำลังอิฐที่ผสมเศษแก้ว	59
4-3	ค่าความหนาแน่นแห้งอิฐ	66

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 แผนภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต 8

2-2 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ ... 11

2-3 แผนภาพขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิของการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ..... 15

2-4 โพรงอากาศจากการเยิ้มของคอนกรีต..... 16

2-5 วิธีการผลิตอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต 19

2-6 กระบวนการอบไอน้ำแรงดันสูง..... 21

2-7 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน 27

2-8 กราฟลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน 31

3-1 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศของบ่อดินลูกรังห้วยหมอ 35

3-2 สภาพโดยรวมของบ่อดินลูกรังห้วยหมอ..... 36

3-3 การอบดินลูกรังในตู้อบ 36

3-4 การร่อนดินลูกรังเพื่อกำจัดเศษวัชพืช..... 37

3-5 การบดเศษแก้ว..... 38

3-6 การคัดขนาดเศษแก้ว 38

3-7 การนำน้ำผสมในดินตัวอย่าง 40

3-8 การบดอัดดินในโมล 41

3-9 ใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินปากโมลออก 41

3-10 เก็บตัวอย่างดินในโมลเพื่อหาค่าความชื้น 42

3-7 การนำน้ำผสมในดินตัวอย่าง 40

3-8 การบดอัดดินในโมล 41

3-9 ใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินปากโมลออก 41

3-10 เก็บตัวอย่างดินในโมลเพื่อหาค่าความชื้น 42

3-11 ส่วนประกอบของ Mini compactor 44

3-12 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว 45

3-13 แบบหล่อมอร์ตาร์มาตรฐานขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร 46

3-14 ดินลูกรัง เศษแก้ว ปูนซีเมนต์และน้ำสะอาดที่ชั่งน้ำหนักแล้ว..... 49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3-15 ผสมปูนซีเมนต์กับดินลูกรังให้เข้ากัน 49
3-16 นำเศษแก้วมาผสมให้เข้ากัน..... 49
3-17 เติมน้ำลงไปคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากัน 50
3-18 การบดอัดส่วนผสมในแบบหล่อ..... 50
3-19 ปาดผิวหน้าให้เรียบ และเสมอกับขอบแบบหล่อ 51
3-20 ใช้ฟองน้ำชุบน้ำเช็ดผิวด้านบนของแบบหล่อ 51
3-21 ใช้ฟองน้ำชุบน้ำเช็ดผิวด้านข้างของแบบหล่อ..... 52
3-22 ประกอบแท่นกดมอร์ตาร์กับเครื่องทดสอบกำลัง 53
3-23 ตั้งอัตราเร็วในการเพิ่มแรงกดในการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์..... 53
3-24 นำอิฐวางในแท่นกดมอร์ตาร์ 54
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังกับค่าความเครียด 55
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ไม่ผสมเศษแก้วกับอายุบ่ม 57
4-3 เปรียบเทียบรูปทรงของเศษแก้วที่ค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ 59
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 กับอายุบ่ม. 60
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 กับอายุบ่ม. 60
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 กับอายุบ่ม 61
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 กับอายุบ่ม 61
4-8 กำลังอัดระหว่างอิฐที่ผสมเศษแก้วกับอิฐที่ผสมทรายละเอียดที่ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก . 62
4-9 กำลังอัดระหว่างอิฐที่ผสมเศษแก้วกับอิฐที่ผสมทรายละเอียดที่ร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก . 63
4-10 กำลังอัดระหว่างอิฐที่ผสมเศษแก้วกับอิฐที่ผสมทรายละเอียดที่ร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก 63
4-11 การแตกหักแบบรูปพีรามิด 64
4-12 การแตกหักแบบแยกออก..... 64
4-13 ลักษณะการแตกหักของอิฐ 65
4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิฐแห้งกับปริมาณการแทนที่ด้วยทรายหรือ
เศษแก้ว..... 67
4-15 ลักษณะผิวของอิฐที่แทนที่เศษแก้วขนาดต่าง ๆ 68
4-16 ความเข้มของสีเศษแก้วขนาดต่าง ๆ 68

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการศึกษาข้อมูลการใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างผนังทำให้ทราบว่าในงานก่อสร้างทั่วไปนิยมนำอิฐมอญมาใช้ในการก่อสร้างผนัง เพราะอิฐมอญมีราคาถูก น้ำหนักเบา แข็งแรงและมีอายุการใช้งานสูง แต่หากพิจารณาถึงขั้นตอนการผลิตอิฐมอญจะพบว่ามีความยุ่งยากและควบคุมการผลิตได้ยาก เพราะต้องนำดินเหนียวผสมกับแกลบและน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม นำไปขึ้นรูปแล้วผึ่งให้แห้ง แล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส จนอิฐสุกเปลี่ยนเป็นสีแดง ซึ่งเห็นได้ว่าการผลิตอิฐมอญต้องใช้เชื้อเพลิงปริมาณสูงจึงไม่เหมาะกับสภาวะโลกร้อน จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุอื่น ๆ มาทดแทนอิฐมอญ ได้แก่ ผนังยิปซัมบอร์ด อิฐมวลเบา อิฐบล็อกคอนกรีต และอิฐดินประสาน เป็นต้น

เมื่อพิจารณาถึงทางเลือกอื่นในการคัดเลือกวัสดุก่อผนังนอกจากอิฐมอญและอิฐบล็อกคอนกรีตแล้ว อิฐดินประสานเป็นวัสดุหนึ่งที่ได้ริเริ่มนำมาในงานก่อสร้างโดยมีจุดเด่น ได้แก่ อิฐดินประสานมีความสวยงามและลดขั้นตอนในการฉาบปูนเรียบ อีกทั้งมีความแข็งแรงกว่าอิฐมอญ ระบบการก่อสร้างด้วยอิฐดินประสานเป็นระบบการก่อสร้างแบบผนังรับน้ำหนัก ทำให้การก่อสร้างเป็นไปด้วยความรวดเร็ว สามารถประยุกต์เป็นโครงสร้างรับน้ำหนักได้ การก่อสร้างไม่ต้องใช้แรงงานที่มีฝีมือมากนักในการก่ออิฐดินประสาน ซึ่งขั้นตอนในการผลิตอิฐดินประสานจะใช้ดินลูกรังผสมทรายละเอียดและใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัตถุดิบหลัก ส่งผลให้ผิวของอิฐมีสีแดงเหมือนดินลูกรัง โดยมีน้ำเป็นวัสดุประสานขึ้นรูป โดยใช้เครื่องอัดซินวาแรมเพื่อให้ได้อิฐที่มีขนาดและรูปทรงตามที่ต้องการ โดยทั่วไปการเลือกดินลูกรังที่ใช้เป็นมวลรวมหลักในการผลิตอิฐดินประสานดินลูกรังที่นำมาใช้จะต้องมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าตระแกรงเบอร์ 4

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาอิฐดินประสานให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น โดยทำให้ผิวของอิฐมีความแวววาวเหมือนแก้ว จากการแทนที่ทรายละเอียดด้วยเศษแก้วบดที่ร่อนผ่านตระแกรงเพื่อคัดขนาดและอิฐดินประสานที่แทนที่ทรายละเอียดด้วยเศษแก้วบด ต้องมีสมบัติผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547 ซึ่งมีการกำหนดค่ากำลังอัดสำหรับชนิดรับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของขนาดของเศษแก้วต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของอิฐดินประสาน ที่ใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมละเอียด

2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณการแทนที่ของเศษแก้วในส่วนผสมต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของอิฐดินประสาน ที่ใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมละเอียด

3. เพื่อพัฒนาการผลิตอิฐดินประสานจากการนำเศษแก้วแทนที่ทรายละเอียดให้มีสมบัติผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547

สมมติฐานของการวิจัย

ส่วนประกอบในการผลิตอิฐดินประสานประกอบด้วยดินลูกรัง ทรายละเอียดและปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนประมาณ 4.5 : 4.5 : 1 โดยน้ำหนักในส่วนของน้ำจะใช้ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานวัสดุเฉื่อย ได้แก่ ดินลูกรังและทรายละเอียดใช้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนขึ้นรูป โดยใช้เครื่องอัดซินวาแรมเป็นรูปทรงแบบต่าง ๆ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะวัสดุเฉื่อยที่ใช้การผลิตอิฐดินประสานการนำเศษแก้วแทนที่ทรายละเอียดมีความเป็นไปได้ในการผลิต เพราะเศษแก้วเป็นวัสดุเฉื่อยไม่ทำไปฏิกิริยากับน้ำและปูนซีเมนต์ ความแข็งแรงและแรงเสียดทานที่ผิวสูงเหมาะที่จะนำมาแทนที่ทรายละเอียด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สร้างแนวคิดในการปรับปรุงวัสดุก่อสร้างให้มีประโยชน์ใช้สอยและความสวยงามมากขึ้น

2. ได้แนวทางพัฒนาการผลิตอิฐดินประสานจากการนำเศษแก้วแทนที่ทรายละเอียดให้มีสมบัติผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547

3. เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้

ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าอิสระในครั้งนี้ มุ่งเน้นศึกษาแนวทางพัฒนาการผลิตอิฐดินประสาน จากการนำเศษแก้วแทนที่ทรายละเอียด ให้มีสมบัติผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547 โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของดินลูกรัง ได้แก่ การกระจายตัวของดิน โดยการทดลองหาขนาดมวลคละของดินโดยการร่อนผ่านตะแกรง การหาค่า Optimum moisture content (OMC) ของดินลูกรังโดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน

2. ศึกษาสมบัติทางกลของดินลูกรังโดยการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่ทำการบดอัดแบบมาตรฐานโดยใช้เครื่อง Mini compactor

3. ศึกษาสมบัติการรับกำลังอัดของอิฐดินประสานโดยการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้ได้วางกรอบขอบเขตวิธีการวิจัยถึงวัตถุดิบที่นำมาทดสอบ ตลอดจนถึงการตรวจวิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการ เพื่อบรรลุถึงวัตถุประสงค์จึงต้องจัดระเบียบขั้นตอนการดำเนินงานตามเกณฑ์มาตรฐาน ที่มีการยอมรับ และเครื่องมือตามมาตรฐานซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของการศึกษาค้นคว้ามีดังนี้

คอนกรีต

คอนกรีต (Concrete) คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะเป็นวัสดุที่มีสมบัติหลายประการที่เหมาะสม อาทิเช่น สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามที่ต้องการได้ มีความคงทนสูง ไม่ติดไฟ สามารถเทหล่อได้ในสถานที่ก่อสร้าง ตกแต่งผิวให้สวยงามได้ และที่สำคัญคือ มีราคาไม่แพง โดยเฉพาะเมื่อเทียบราคากับเหล็กรูปพรรณ โดยทั่วไปคอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสมพื้นฐาน 2 ส่วน คือ

1. ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ น้ำ และสารผสมเพิ่ม
2. มวลรวม (Aggregates) ได้แก่ มวลรวมละเอียดหรือทราย และมวลรวมหยาบ หรือหินกรวด

เมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ เหล่านี้มาผสมกันจะได้คอนกรีตที่คงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่งพอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการได้ เรียกคอนกรีตในสภาพนี้ว่า “คอนกรีตสด (Fresh concrete)” หลังจากนั้นคอนกรีตจะเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งในเวลาต่อมา โดยจะมีกำลังหรือความแข็งแรงมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น และเมื่อมีสมบัติผ่านข้อกำหนดงานคอนกรีตตามที่ออกแบบไว้ จึงจะสามารถเปิดใช้งานรับน้ำหนักได้ต่อไป เรียกคอนกรีตภายหลังจากเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งแล้วนี้ว่า “คอนกรีตแข็งตัว (Hardened concrete)”

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดการเผาส่วนผสมต่าง ๆ จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีสำคัญ คือ แคลเซียมและอะลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) หรือเรียกว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและ

แข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าว เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมปัจจุบัน โดยที่เมื่อผสมกับ หิน กรวด ทรายและน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ภายหลังแข็งตัวแล้วจะแกร่งและทนทานคล้ายหิน สิ่งก่อสร้างคอนกรีตสาธารณูปโภคได้แก่ ฐานราก ตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้นและถนน เมื่อเสริมด้วยเหล็กจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับ พื้น หลังคา สะพาน อาคาร อุโมงค์ และอื่น ๆ

สมบัติของปูนซีเมนต์

1. องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบได้รับการเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนหรือดินสอพองเหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียม (จากหินปูนหรือดินสอพอง) กับซิลิกา อะลูมิน่าและเหล็ก (จากดินดำ ดินเหนียว หรือหินดินดาน)

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยกระบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO_2, AIO_3, และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์

กลุ่มที่ 2 ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na_2O, K2O, TiO_2, P_2O_5, และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2. สมบัติของสารประกอบหลัก

สารประกอบหลักที่ได้จากปูนเม็ดประกอบด้วย 4 ชนิด มีผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ดังนี้

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S หรือ Alite) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีอ่อนกว่า C_2S สมบัติของ C_3S จะเหมือนกับสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์ของ C_3S เพิ่มขึ้น โดยปริมาณยิปซัมจะมีผลต่อกำลังอัดของ C_3S ด้วย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3S อยู่ประมาณร้อยละ 50-70

ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S หรือ Belite) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแต่มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่มีความเสถียร ณ อุณภูมิทั่วไป βC_2S มีสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวและเกิดความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ ในช่วงแรกและกำลังจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุมากกว่า 7 วัน แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_2S อยู่ประมาณร้อยละ 15-30

ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเหลี่ยม จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงไปในขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัว เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ C_3A และจะพัฒนาในช่วง 1-2 วัน แต่มีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำกว่า จะสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดีกว่า

เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF หรือ Celite) เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอะลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และจะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา C_4AF มีสมบัติทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และก่อตัวภายในชั่วขณะหนึ่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม ค่ากำลังอัดของ C_4AF มีค่าต่ำไม่แน่นอน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ประมาณร้อยละ 5-15

3. การก่อตัวและแข็งตัว

ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)” ทำให้มีสมบัติในการรับแรงได้

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวและสามารถลื่นไหลได้ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยจะเรียกช่วงเวลาที่สมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า “ช่วงสงบ (Dormant period)” หลังจากนั้น ซีเมนต์เพสต์จะเริ่มจับตัว (Stiff) ถึงแม้ว่าจะยังนิ่มอยู่แต่ก็จะไม่สามารถไหลตัวได้อีกแล้ว (Unworkable) จุดนี้จะเป็นจุดที่เรียกกันว่า “จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial set)” และระยะเวลาตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดนี้เรียกว่า “เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time)” การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่เป็นของแข็งที่คงสภาพ (Rigid solid) ซึ่งจะเรียกว่า “จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final set)” และเวลาที่ใช้จนถึงจุดดังกล่าวเรียกว่า “เวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time)” ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไปจนกระทั่งสามารถรับน้ำหนักได้กระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่า “การก่อตัวและการแข็งตัว (Setting and hardening)”

4. ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ ดังนี้ คือ

4.1 อาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออน (Ions) ในสารละลาย และไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

4.2 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction)”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารปะกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์

ลักษณะที่ 1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

แคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด “แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)” ประมาณร้อยละ 15-25 และสารประกอบ “แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate หรือ $3Cao{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH)” ที่ทำหน้าเป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3S

$$2\,(3CaO{\cdot}SiO_2) + 6\,H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2\text{-}1)$$

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

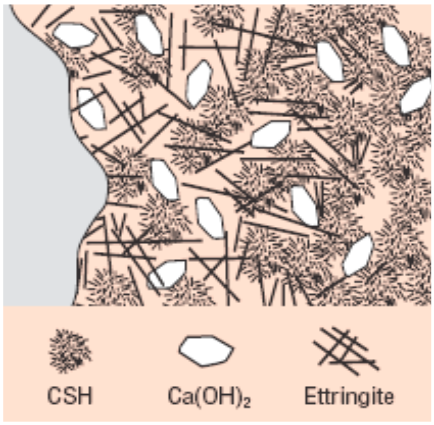
สมการของ C_2S

$$2\,(2CaO{\cdot}SiO_2) + 4\,H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2\text{-}2)$$

หรือ $2\,C_2S + 4\,H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดวุ้น (Gel) ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (ภาพที่ 2-1)

นอกจากนี้ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก



ภาพที่ 2-1 แผนภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต
(บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2548)

ลักษณะที่ 2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3A

$$3CaO\cdot AI_2O_3 + 6\,H_2O \rightarrow 3CaO\cdot AI_2O_3\cdot 6H_2O \quad (2\text{-}3)$$

หรือ $C_3A + 6\,H_2O \rightarrow C_3AH_6$

ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์จะมีการใส่ยิปซัมเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดยยิปซัมที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการต่อไปนี้

$$3CaO\cdot AI_2O_2 + CaSO_4\cdot 2H_2O \rightarrow 3CaO\cdot AI_2O_3\cdot 3\,CaSO_4\cdot 31H_2O \quad (2\text{-}4)$$

หรือ C_3A + Gypsum $\rightarrow$ Ettringite

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_3A เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate lons มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

5. การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

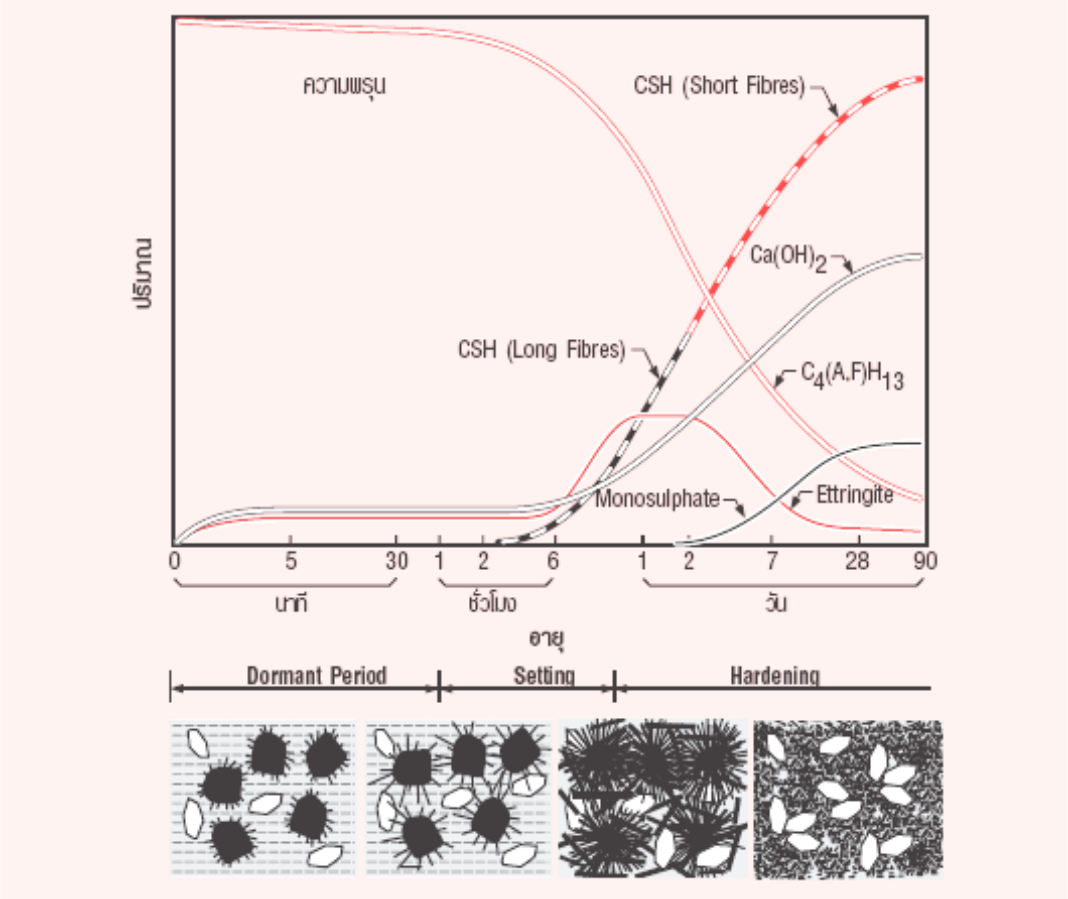
บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), (2548) ได้อธิบายผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยรวมของสารประกอบทั้ง 4 นั้น ซึ่งหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะเกิดวุ้น CHS และ Ettringite เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์ และเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิดช่วงสงบ อันเป็นช่วงเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่ยังคงสภาพเหลวและสามารถไหลได้ในช่วง 1-2 ชั่วโมง

เมื่อสิ้นสุดช่วงสงบจะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้นโดย CHS ที่เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์จะเกิดการแตกออกด้วยแรงดัน Osmotic ซึ่งแรงดันนี้เกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนในสารละลายที่อยู่ระหว่างวุ้นกับอนุภาคปูนซีเมนต์ และไอออนในสารละลายที่อยู่รอบ ๆ CSH ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป

ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ทีละน้อย จนเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์มากขึ้น ทำให้เกิดจุดเชื่อมต่อมากขึ้น จนอนุภาคปูนซีเมนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และกลายเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งถือว่าเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย

จากภาพที่ 2-2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ โดยอนุภาคปูนซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่ $Ca(OH)_2$ จะแสดงด้วยรูปหกเหลี่ยม ส่วน Ettringgite และ CHS จะแสดงด้วยเส้นสั้นทึบ และเส้นสั้นบางตามลำดับ ซึ่งในช่วงสงบ อนุภาคปูนซีเมนต์จะอยู่แยกกัน และจะเกิด $Ca(OH)_2$ และ Ettringgite เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง วุ้น CSH จะเริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัวของวุ้น CSH นี้ก่อให้เกิดการก่อตัวในขณะที่ของแข็งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ความพรุนของซีเมนต์เพสต์จะลดลง และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว Sulphate ions ถูกใช้หมดไป ออกไซด์ของอะลูมิเนียมและเหล็กเริ่มก่อตัว และ Ettringite ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate) ส่วน C3S และ C2S จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่าระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของซีเมนต์เพสต์ลดลงในระยะยาว โดยระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบดังตารางที่ 2-1



ภาพที่ 2-2 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ (บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2548)

ตารางที่ 2-1 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80 (บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2548)

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

มวลรวม

ชัชวาล เศรษฐบุตร, (2545) ได้ให้ความหมายของมวลรวม คือ วัสดุเฉื่อยที่ใช้เป็นวัสดุแทรกในคอนกรีต เช่น หิน กรวด และทราย เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมมีปริมาตรมากถึงร้อยละ 70-80 ของปริมาณคอนกรีตทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่น่าเป็นที่สงสัยเลยว่าทำไมคุณภาพของมวลรวมมีผลกระทบต่อสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก จึงมีความจำเป็นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องให้ความสำคัญกับมวลรวมไม่น้อยไปกว่าปูนซีเมนต์

1. การจำแนกมวลรวมตามขนาด

มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) คือ หินหรือกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร (ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลรวมผสมคอนกรีต หรือ มอก. 566 ยอมให้มวลรวมหยาบมีส่วนที่ละเอียดกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง

มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) คือ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือ ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) โดยมาตรฐาน มอก. 566 ยอมให้มวลรวมละเอียดมีส่วนที่หยาบกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง ทรายสำหรับผลิตคอนกรีตควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3-3.2 ส่วนที่มีขนาดเล็กว่ามวลรวมละเอียด ซึ่งมีอยู่ปริมาณน้อยมากในมวลรวมสามารถแบ่งได้เป็น ทรายแป้ง (Silt) มีขนาดประมาณ 0.07 มิลลิเมตร และดินเหนียว (Clay) มีขนาดอยู่ในช่วง 0.02-0.06 มิลลิเมตร

2. การจำแนกมวลรวมตามหน่วยน้ำหนัก

มวลรวมน้ำหนักเบา (Light weight aggregate) มวลรวมที่มีความหนาแน่นแบบคิวหลวม (Bulk density) น้อยกว่า 1,120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.3-1.1)

มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normal weight aggregate) ได้แก่ หินย่อย กรวด และทราย มีความหนาแน่นแบบคิวหลวม (Bulk density) อยู่ในช่วงประมาณ 1,300-1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.4-3.0) และทำให้คอนกรีตที่มีน้ำหนักตามปกติ (Normal-weight concrete) มีหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ประมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

มวลรวมน้ำหนักหนัก (Heavy weight aggregate) มวลรวมที่มีความหนาแน่นแบบคิวหลวม (Bulk density) มากกว่า 2,080 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (มีค่าความถ่วงจำเพาะมากว่า 4)

3. การจำแนกมวลรวมตามแหล่งกำเนิด

มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural mineral aggregate) เป็นมวลรวมที่เกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ ได้แก่ หิน กรวด และทราย

มวลรวมสังเคราะห์ (Artificial aggregate หรือ Synthetic aggregate) เป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน เช่น ดินเหนียวที่พองตัว (Expanded clay) ที่ใช้ทำมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate) มวลรวมที่ทำจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม (Industrial by-products) เช่น ตะกรันเตาถลุง (Blast-furnace slag) และเถ้าลอย (Fly ash) เป็นต้น มวลรวมที่ทำจากของเสียจากชุมชน และมวลรวมที่เกิดจากการนำซากอาคารและถนนคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ (Recycled concrete) เป็นต้น

4. การจำแนกตามโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus; F.M.)

โมดูลัสความละเอียด คือ ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวมโดยคำนวนจาก

โมดูลัสความละเอียด = ผลบวกของร้อยละสะสมของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน/ 100

โดยตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ คือ ขนาดเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50 และ 100

ทรายสำหรับคอนกรีตควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3-3.2 ทรายที่มีค่า F.M. สูงกว่า จะมีความหยาบมากกว่า เช่น ทรายที่มีค่า F.M. = 3.2 จะมีความหยาบมากกว่าทรายที่มีค่า F.M. = 2.3 เป็นต้น ทรายที่มีความละเอียดมากจำเป็นต้องใช้น้ำมากเพื่อให้ได้ความสามารถเทได้เท่า ๆ กัน

การบ่มคอนกรีต

บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), (2548) การบ่มคอนกรีต คือ การช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตโดยการรักษาอุณหภูมิและลดการสูญเสียน้ำ วิธีการบ่มอาจทำได้หลายวิธี โดยการให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว คอนกรีตจำเป็นต้องได้รับการบ่มทันทีหลังจากคอนกรีตเริ่มแข็งตัวแล้ว และควรบ่มต่อไปจนกระทั่งคอนกรีตมีกำลังตามต้องการ การบ่มที่ดีจะต้องสามารถป้องกันคอนกรีตไม่ให้เกิดการสูญเสียความชื้นไม่ว่าจะด้วยความร้อนหรือลมไม่ให้คอนกรีตร้อนหรือเย็นเกินไป ไม่สัมผัสสารเคมีที่มีอันตรายต่อคอนกรีต และไม่ถูกชะล้างจากน้ำฝนหลังจากเทคอนกรีตเสร็จใหม่ ๆ นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือน การกระแทกการรับน้ำหนักมากเกินไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้น ๆ ของคอนกรีต โดยวิธีการบ่มสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. การบ่มคอนกรีตโดยการเพิ่มน้ำ

วิธีการนี้จะใช้วิธีเพิ่มน้ำหรือความชื้นแก่คอนกรีตโดยตรง ในระยะที่คอนกรีตเริ่มแข็งตัวอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่กำหนด โดยการปล่อยให้น้ำขังบิเวณผิวหน้าคอนกรีต หรือใช้วัสดุที่เปียกชื้นคลุมผิวไว้ตลอดเวลา วิธีนี้นอกจากเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้ยังช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีต จึงเหมาะกับบริเวณที่มีอากาศร้อน

2. การบ่มคอนกรีตโดยการป้องกันการสูญเสียความชื้น

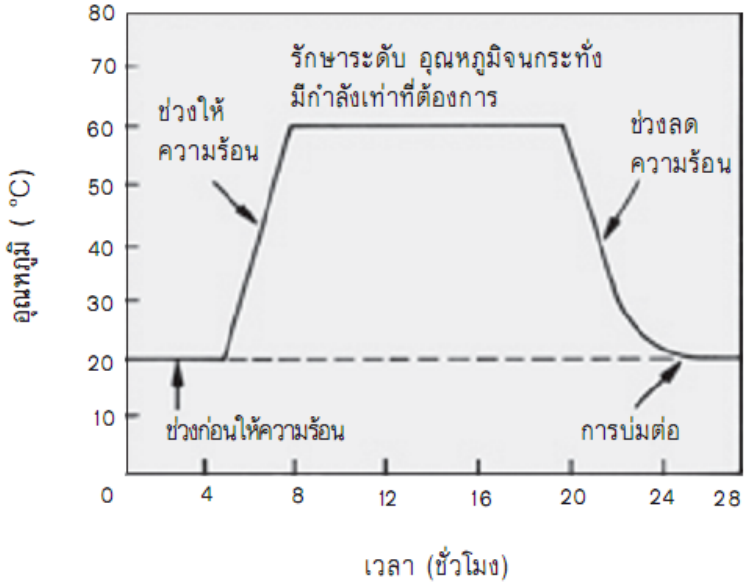
วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตไม่ให้ออกสู่ภายนอกโดยใช้วัสดุปิดทับ ทำหน้าที่เป็นแผ่นคลุมผิวคอนกรีตไว้เพื่อลดการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีต โดยส่วนใหญ่จะให้แผ่นพลาสติกคลุมผิวไว้ หรือใช้น้ำยาบ่มคอนกรีตทาผิวคอนกรีต

3. การบ่มด้วยไอน้ำที่แรงดันต่ำ

วิธีการนี้จะใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 40-100 องศาเซลเซียส ในการเพิ่มกำลังอัดแก่คอนกรีต วิธีการนี้สามารถเพิ่มกำลังอัดแก่คอนกรีตได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาน้อยกว่าการบ่มที่อุณหภูมิปกติ การบ่มด้วยวิธีนี้หากใช้อุณหภูมิต่ำกำลังอัดประลัยจะสูงกว่าการใช้อุณหภูมิสูง สิ่งที่สำคัญสำหรับการบ่มวิธีนี้อีกอย่าง คือ ต้องทำการควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง จนถึงอุณหภูมิที่เราต้องการและรักษาอุณหภูมิไว้ให้คงที่ตามระยะเวลาที่กำหนดก่อนจะทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ โดยมีอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 20-30 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ดังภาพที่ 2-3 นอกจากนี้ควรทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิห้องหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วประมาณ 2-6 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเบื้องต้นเสร็จสิ้นก่อน

4. การบ่มด้วยไอน้ำที่แรงดันสูง

วิธีการนี้จะใช้สำหรับการบ่มที่อุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องเพิ่มความกดดันในภาชนะปิด เพื่อให้อุณหภูมิไอน้ำสูงเกิน 100 องศา ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “Autoclave” วิธีนี้โดยส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิอยู่ประมาณ 160-210 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 6-20 บรรยากาศ การบ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงที่สภาวะดังกล่าวคอนกรีตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งมีสมบัติที่ดีกว่าการบ่มโดยวิธีทั่วไปและการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ โดยพบว่าการบ่มด้วยวิธีนี้ช่วยให้เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้เทียบเท่าการบ่มปกติที่ 28 วัน สามารถนำไปใช้งานภายใน 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังช่วยให้การหดตัวและการล้าเกิดขึ้นน้อยมาก แต่ในทางปฏิบัติการบ่มวิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายสูงมากจึงนิยมใช้บ่มกับคอนกรีตสำเร็จรูปเท่านั้น (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2545)



ภาพที่ 2-3 แผนภาพขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิของการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ (บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2548)

การยึดเกาะและการแยกตัวของคอนกรีต

คุณลักษณะของคอนกรีตที่ดีทั่วไปต้องมีการกระจายตัวของมวลรวมสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อน การกระจายตัวที่สม่ำเสมอของมวลรวมนี้ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานยึดเกาะกับมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบได้อย่างทั่วถึง ทำให้คอนกรีตรับกำลังได้ดี หากคอนกรีตเกิดการแยกตัวระหว่างมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบซึ่งมีสาเหตุหลัก ๆ จากการใช้อัตราส่วนผสมคอนกรีตไม่เหมาะสม ใช้มวลรวมที่มีความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันมาก และมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงเกินไป อีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากกระบวนการในการทำงาน เช่น การลำเลียงคอนกรีตให้ไหลในรางที่ยาวมาก ๆ และการจี้คอนกรีตมากเกินไป วิธีที่ใช้ในการป้องกันการแยกตัวของคอนกรีตสามารถทำได้ โดยเริ่มจากการคัดเลือกมวลรวมให้มีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันมีการกระจายตัวของขนาดคละดี ออกแบบส่วนผสมให้เหมาะสมกับการใช้งานอาจใช้น้ำยาลดน้ำตามความเหมาะสม และใช้เครื่องจี้คอนกรีตอย่างถูกวิธีไม่จี้คอนกรีตมากหรือน้อยเกินไป

การเยิ้มของคอนกรีต

บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), (2548) ได้อธิบายพฤติกรรมการเยิ้มของคอนกรีต คือ สภาวะการคายน้ำจากส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งมักจะเกิดขึ้นขณะทำการจี้คอนกรีต โดยจะสังเกตได้ว่ามีน้ำส่วนหนึ่งลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งน้ำส่วนเกินนี้เกิดขึ้นขณะจี้คอนกรีต มวลรวมจะจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่ชิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการดันตัวของน้ำที่มีความหนาแน่นน้อยสุดลอยขึ้นสู่ด้านบน เกิดเป็นโพรงอากาศดังภาพที่ 2-4 การเยิ้มจะส่งผลเสียต่อคอนกรีตใน 3 ลักษณะ คือ

1. ผิวด้านบนของคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงกว่าบริเวณอื่น ทำให้เมื่อคอนกรีตแข็งตัวกำลังอัดบริเวณผิวด้านบนต่ำ เกิดการแตกร้าวและเป็นฝุ่น

2. น้ำที่ลอยตัวขึ้นสู่ผิวด้านบนคอนกรีตบางส่วนจะถูกกักเก็บไว้ใต้มวลรวมหยาบและเหล็กเสริม ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ต้าร์ตรงบริเวณนี้ลดลงมาก เมื่อคอนกรีตแข็งตัวอาจเกิดเป็นโพรงขึ้น

3. การดันตัวของน้ำแทรกผ่านมอร์ต้าร์บางครั้งอาจทำให้เกิดโพรงรูเล็ก (Capillary pores) กระจายบริเวณผิวหน้าคอนกรีตทำให้คอนกรีตบริเวณนี้มีกำลังได้ไม่ดีนัก โดยเฉพาะหากคอนกรีตมีน้ำอยู่ในโพรงแล้วน้ำภายในโพรงเกิดการแข็งตัวขึ้น จะดันคอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ปัญหานี้มักพบในคอนกรีตที่ใช้ทำผนังห้องเย็น

ภาพที่ 2-4 โพรงอากาศจากการเยิ้มของคอนกรีต (บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2548)

การจี้คอนกรีต

การจี้คอนกรีต คือ กระบวนการไล่ฟองอากาศออกจากคอนกรีตสด ทำให้มวลรวมเรียงตัวชิดยิ่งขึ้น เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะมีช่องว่างน้อยลง หากทำการจี้คอนกรีตอย่างถูกวิธีจะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ไม่แยกตัวและเป็นโพรง เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต และระหว่างคอนกรีตกับมวลรวม ช่วยลดการแตกร้าวเพิ่มความแข็งแรงให้คอนกรีต การจี้คอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี ตามลักษณะเครื่องมือ ดังนี้

1. การใช้แรงคนกระทุ้งคอนกรีต วิธีการนี้เหมาะสำหรับการหล่อคอนกรีตปริมาณน้อย โดยหลังจากเทคอนกรีตลงในแบบเสร็จแล้วจะใช้ไม้หรือเหล็กกระทุ้งจนคอนกรีตในแบบหล่อแน่น ในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตตามมาตรฐานก็ใช้เหล็กกระทุ่งในแบบหล่อ โดยกระทุ้ง 3 ชั้น ๆ ละ 35 ครั้ง

2. การใช้เครื่องจี้คอนกรีต จะใช้เครื่องจี้คอนกรีตซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์และหัวจี้ วิธีนี้จะใช้หัวจี้จุ่มลงในคอนกรีตสด โดยหัวจี้จะปล่อยคลื่นความถี่ประมาณ 70-200 เฮิร์ทซ์ การใช้เครื่องจี้คอนกรีต จะต้องจุ่มหัวจี้ลงไปในแนวดิ่งในเนื้อคอนกรีต และดึงขึ้นช้า ๆ ทุก ๆ ระยะ 0.5-1 เมตร เพื่อให้ไล่ฟองอากาศให้มากที่สุดและควรหลีกเลี่ยงการดึงหัวจี้ขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้คอนกรีตเป็นโพรง

3. การใช้เครื่องเขย่าคอนกรีต วิธีการนี้จะใช้แบบหล่อติดไว้กับเครื่องเขย่า ซึ่งวางบนพื้นที่ยืดหยุ่น คอนกรีตและแบบหล่อจะถูกเขย่าไปพร้อม ๆ กัน โดยใช้ความถี่ประมาณ 50-100 เฮิรตซ์ วิธีนี้มักใช้กับคอนกรีตอัดแรงหรือคอนกรีตที่มีขนาดบาง ซึ่งจะได้คอนกรีตที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและปริมาณฟองอากาศน้อยกว่าการใช้เครื่องจี้คอนกรีต

จากที่กล่าวมาเป็นการจี้คอนกรีตทันทีหลังจากคอนกรีตถูกเทลงในแบบหล่อ ภายหลังจากการจี้คอนกรีตในครั้งแรกแล้ว ทิ้งไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง ควรทำการจี้คอนกรีตซ้ำ เพื่อทำการขจัดน้ำที่เยิ้มออกมาจากคอนกรีต การจี้คอนกรีตซ้ำช่วยเพิ่มกำลังอัดได้ถึงร้อยละ 15 แต่ถ้าหากทิ้งคอนกรีตไว้นานเกินไปแล้วทำการจี้ซ้ำอาจทำให้คอนกรีตเสียหายได้

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของคอนกรีต เช่น กำลังอัดคอนกรีต ความสามารถเทได้ การเยิ้ม และปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต หากพิจารณาเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่ที่ประมาณ 0.28 แต่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์นี้ไม่สามารถใช้ในงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปได้ เนื่องจากคอนกรีตสดจะแห้งมาก

จนไม่สามารถเทเข้าแบบได้ ซึ่งโดยปกติในงานโครงสร้างทั่ว ๆ ไป มักจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อยู่ที่ประมาณ 0.35 ขึ้นไป ทำให้คอนกรีตอยู่ในลักษณะเหลวและสามารถเทเข้าแบบได้ นอกจากนั้นน้ำยังช่วยเคลือบผิวมวลรวมให้เปียกทำให้ซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะได้โดยรอบ แต่ถ้าหากใช้น้ำมากเกินไปจะเกิดน้ำส่วนเกินซึ่งน้ำส่วนเกินนี้จะส่งผลให้มีการแยกตัวของมวลรวม เกิดการเยิ้มของคอนกรีต มีโพรงอากาศในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้เกิดการหดตัว กำลังอัดและคุณภาพของคอนกรีตลดลง

การผลิตคอนกรีตบล็อก

พงศ์พัน วรสุนทโรสถ และวรพงศ์ วรสุนทโรสถ, (2544) คอนกรีตบล็อกผลิตจากปูนซีเมนต์ ทราย หินเกล็ด และน้ำ วิธีการทำเริ่มจากนำปูนซีเมนต์ผสมทราย หินเกล็ดและน้ำผสมเข้าด้วยกันทิ้งไว้ประมาณ 15-20 นาที หลังจากนั้นนำไปใส่ในแบบเหล็กใช้เครื่องอัด ๆ ให้แน่นแล้วนำออกจากแบบไปบ่ม 7-14 วัน จนมีความแข็งแรงตามที่กำหนด คอนกรีตบล็อกจะถูกผลิตในลักษณะอุตสาหกรรมมากกว่าอิฐมอญ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะกลวง (Hollow concrete block) เป็นที่นิยมใช้มาก เนื่องจากมีราคาถูกหาซื้อได้ง่ายและไม่มีปัญหาในขั้นตอนการก่อสร้าง เนื่องจากช่างมีความเคยชินในการทำงานอยู่แล้ว อีกทั้งยังสามารถทำงานได้เร็วเพราะมีขนาดก้อนใหญ่กว่าอิฐมอญ และจากลักษณะที่มีรูกลวงตรงกลาง ทำให้ช่องอากาศภายในนั้นเป็นฉนวนในการกันความร้อนที่ดี แต่ข้อเสีย คือ จะเปราะและแตกง่าย การตอกตะปูยึดพุกต้องทำที่ปูนก่อหรือเสาเอ็นคานเอ็น ที่สำคัญน้ำจะซึมได้ดีกว่าอิฐมอญจึงไม่เหมาะกับการใช้งานบริเวณที่สัมผัสความชื้นอยู่ตลอกเวลา และคอนกรีตบล็อกที่วางขายกันทั่วไปตามท้องตลาด ส่วนใหญ่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานเพราะขาดการควบคุมคุณภาพและไม่ได้รับการบ่มที่ถูกวิธี

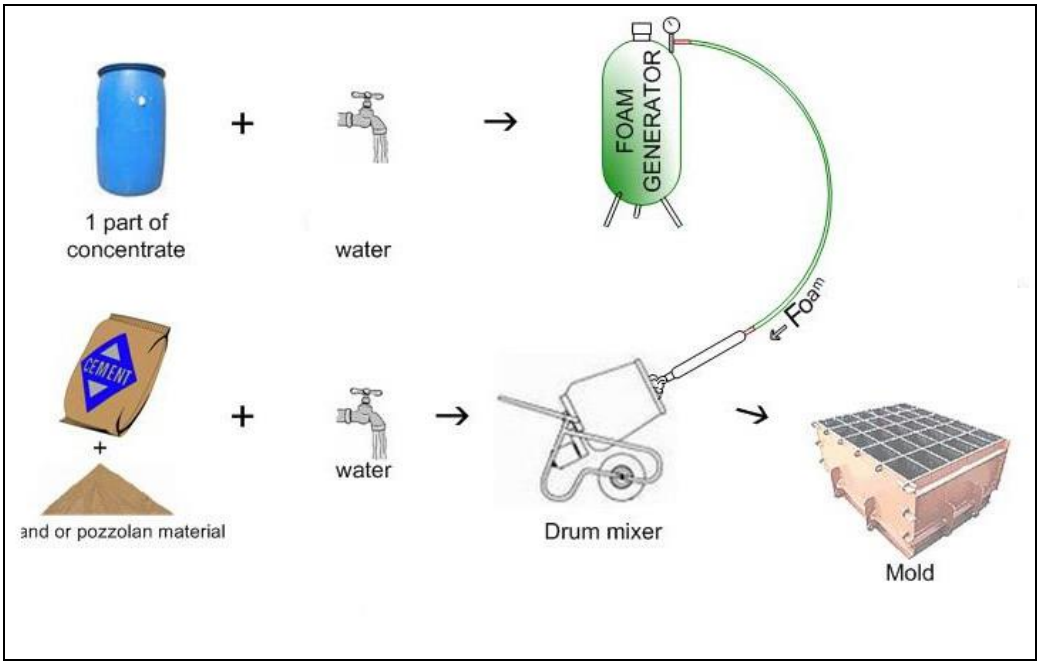
การผลิตคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม

การผลิตคอนกรีตมวลเบาจะใช้เม็ดโฟม (Expandable polystyrene) หรือใช้เศษโฟมมาบดย่อยด้วยเครื่องบดโฟมให้เป็นเม็ดขนาดเล็ก เพื่อนำมาเป็นส่วนผสมคอนกรีตเบา การผลิตจะเริ่มจากนำปูนซีเมนต์ทราย น้ำ และน้ำยา P1 (Bio chemical) ใส่ในเครื่องผสมคอนกรีต หลังจากนั้นจึงเติมเม็ดโฟมลงไป ผสมจนเม็ดโฟมกระจายตัวในเนื้อมอร์ต้าร์สม่ำเสมอจึงเทลงในแบบหล่อ ทิ้งไว้อย่างน้อย 12 ชั่วโมง จึงแกะแบบแล้วนำมาบ่มต่อโดยใช้กระสอบป่านคลุมไว้และพรมน้ำให้เปียกอยู่ตลอดเวลาทิ้งไว้ 12 วัน ก็สามารถนำออกมาใช้งานได้ จุดเด่นของคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟมได้แก่ มีน้ำหนักเบา กันความร้อนและกันเสียงได้ดี มีอายุการใช้นาน ก่อสร้างเร็วสามารถหล่อเป็น

ขนาดต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้ ข้อเสียของคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม คือ ปูนฉาบจะไม่เกาะตรงบริเวณเม็ดโฟม การฉาบนิยมใช้ลวดกรงไก่เป็นตัวประสาน เป็นทั้งเหล็กรับการขยายตัวจากอุณหภูมิ (Temperature steel) และเป็นทั้งเหล็กรับแรงดึง (Tension bonding steel) โดยการขึงลวดกรงไก่เข้าที่ผนังก่ออิฐ ค่อย ๆ สลัดปูนลงไปทีละชั้นพอสลัดได้ที่ก็ค่อยฉาบผิวให้เรียบ

การผลิตอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต

วิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบาจากโฟมคอนกรีต (ดังภาพที่ 2-5) อาศัยหลักการผสมฟองโฟมชนิดพิเศษ นำมาปั่นให้ขึ้นฟองก่อนแล้วจึงนำมาฉีดผสมกับซีเมนต์เพสต์ เทลงในแบบที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ 1 วัน จึงแกะแบบหลังจากนั้นนำไปบ่มต่ออย่างน้อย 7 วัน ก่อนนำไปใช้งาน ฟองโฟมที่แทรกในเนื้อคอนกรีตจะทำให้มีช่องอากาศกระจายตัวอยู่ภายในจำนวนมาก ดังนั้นความหนาแน่นจึงน้อยลงด้วย อิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีตสามารถผลิตได้ง่ายสามารถทำเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้ ขนาดก้อนอิฐขึ้นอยู่กับแบบที่ใช้หล่อ แต่ข้อเสีย คือ การควบคุมคุณภาพอิฐมวลเบาทำได้ยาก



ภาพที่ 2-5 วิธีการผลิตอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต

การผลิตอิฐมวลเบาอบไอน้ำแรงดันสูง

บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดัคส์ จำกัด (มหาชน), (ม.ป.ป.) ได้อธิบายถึงขั้นตอนการผลิตอิฐมวลเบาอบไอน้ำแรงดันสูงโดยมีวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตอิฐมวลเบาอบไอน้ำประกอบด้วย ทรายละเอียดปูนซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซัมและผงอะลูมิเนียม การผสมจะเริ่มจากการนำทรายละเอียดกับยิปซัมมาผสมกันก่อน แล้วจึงเติมปูนซีเมนต์ ปูนขาวและผงอะลูมิเนียมตามลงไป กวนส่วนผสมให้เข้ากันก่อนแล้วจึงค่อยๆ เติมน้ำลงไปในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ประมาณ 0.3 หลังจากนั้นเทลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งอิฐมวลเบาแข็งตัว แกะแบบออกนำเข้าเครื่องตัดและเครื่องทำโครงตาข่าย หลังจากนั้นนำอิฐมวลเบาเข้าเครื่องอบไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง (Autoclaved aerated concrete) โดยใช้อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 2 บาร์ ดังภาพที่ 2-6 ทิ้งไว้ให้อิฐมวลเบาเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ก็สามารถนำมาใช้งานได้ การเกิดช่องว่างในอิฐมวลเบาเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของปูนขาวและผงอะลูมิเนียมได้ก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการ

$$2Al+3Ca(OH)+ 6H_2O \text{ ----------> } 3CaO.\ Al_2O_3.6\ H_2O+3H_2 \qquad (2\text{-}5)$$

ก๊าซไฮโดรเจนจะกระจายตัวและแทรกในเนื้อคอนกรีตในลักษณะทำให้เกิดโพรงปิด (Close cell) ช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ ในอิฐมวลเบาแต่ละก้อนจะมีฟองอากาศมากประมาณร้อยละ 75 ทำให้มีน้ำหนักเบา ส่วนการอบไอน้ำแรงดันสูงเป็นวิธีการเพิ่มกำลังอัดให้กับอิฐมวลเบาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประหยัดเวลาในการผลิต อิฐมวลเบาที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำแรงดันสูงจะเปลี่ยนสีจากสีเทาเป็นสีขาว มีกำลังอัดสูงมีความแข็งแรงทนทาน ก่อสร้างง่ายใช้เวลาน้อย สามารถตอกตะปูบนเนื้ออิฐได้ ใช้ความหนาปูนฉาบน้อย จากที่กล่าวมาจึงทำให้อิฐมวลเบาอบไอน้ำได้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายกว่าอิฐมวลเบาชนิดอื่นโดยเฉพาะที่พักอาศัย แต่ข้อเสียคือ มีราคาสูงนอกจากนี้ยังต้องใช้ปูนฉาบและปูนก่อชนิดพิเศษและมักเกิดการร่อนของปูนฉาบ

ภาพที่ 2-6 กระบวนการอบไอน้ำแรงดันสูง (บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดัคส์ จำกัด (มหาชน), (ม.ป.ป.))

ทฤษฎีและขั้นตอนการผลิตอิฐดินประสาน

พงศ์พัน วรสุนทโรสถ และวรพงศ์ วรสุนทโรสถ, (2544) เพื่อให้การผลิตอิฐดินประสานมีคุณภาพได้มาตรฐานเพียงพอแก่การนำไปใช้เป็นวัสดุก่อ ในการก่อสร้างอาคารแบบผนังรับน้ำหนักรวมทั้งเพื่อการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถูกต้องตามหลักวิชาการ และประหยัด ดังนั้นแนวทางและข้อแนะนำในการผลิตอิฐดินประสาน มีดังต่อไปนี้

1. การเลือกดินวัตถุดิบ (Choice of soil) อิฐดินประสานจะมีคุณภาพและคุณสมบัติที่ดี สิ่งสำคัญอันดับแรก ได้แก่ คุณภาพของดินที่เหมาะสมจะพิจารณาในด้านองค์ประกอบและขนาดของมวลผสมที่เหมาะสม โดยทั่วไปดินที่สามารถนำมาทำเป็นอิฐดินประสาน ได้แก่ ดินลูกรัง รวมทั้งดินทราย เป็นดินตื้นโดยปกติจะมีกรวด ลูกรัง หรือเศษหินปะปนอยู่ ควรเลือกดินที่มีลักษณะร่วน ไม่มีกรวด ลูกรัง เศษหินที่มีขนาดใหญ่กว่า 4 มิลลิเมตร ปะปนอยู่มาก เนื่องจากจะต้องคัดทิ้งไปเป็นปริมาณมาก หรือสิ้นเปลืองในการบด ดินเหนียว ที่ปะปนอยู่จะต้องมีอยู่ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดจนรู้สึกเหนียวติดมือ นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพโดยเฉพาะขนาดของมวลรวมของดินมีความสำคัญต่อความแข็งแรงและการคงรูปของอิฐดินประสาน ดินที่เหมาะสมควรมีองค์ประกอบส่วนผสมและขนาดดังตารางที่ 2-2 โดยมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังตารางที่ 2-3 ข้อแนะนำเพิ่มเติมในการคัดเลือกดินลูกรังมาเป็นวัตถุดิบ ควรพิจารณาเลือกดินที่ดีที่สุดที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น (เพื่อลดต้นทุนและค่าขนส่ง) หากไม่มีให้เลือกดินที่มีคุณภาพปานกลาง (Mediocre soil)

และนำมาปรับปรุงคุณภาพ นอกจากนี้การใช้ดินที่มีขนาดมวลรวมและปริมาณสัดส่วนคละที่ดี (Well-graded soil) จะทำให้ได้อิฐดินประสานที่มีคุณภาพดีและประหยัดการใช้ปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2-2 ขนาดของดินที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นอิฐดินประสาน

ชนิดของมวลรวม	ขนาด (มิลลิเมตร)	ปริมาณ (ร้อยละ)
ทรายหยาบ (Coarse sand)	2.000-0.200	75-85
ทรายละเอียด (Fine sand)	0.200-0.020	-
ฝุ่น/ ผงดิน (Silts)	0.020-0.002	10-25
ดินเหนียว/ เลน (Clay)	0.002-0.000	-
อินทรีย์วัตถุ	-	ต้องไม่มากกว่า 1-2

2. การร่อนคัดขนาดและการบดวัตถุดิบ (Grading & Pulverization) เพื่อให้การผลิตสามารถประหยัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ได้มากที่สุด การบดร่อนดินหรือวัตถุดิบ เป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก ขนาดของดินที่ใหญ่ที่สุดในการนำมาใช้งานควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร จากข้อมูลวิชาการพบว่าถ้ามีขนาดของมวลใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไป อาจทำให้กำลังต้านทานแรงอัด (Compressive strength) ของอิฐดินประสานลดลงกว่าร้อยละ 50 เพื่อให้ได้คุณสมบัติของการรับกำลัง (Mechanical strength) และความต้านทานต่อน้ำ (Resistance to water) สิ่งที่จำเป็นต้องกระทำ ได้แก่ การลดช่องว่างระหว่างมวล (Reduce the void ratio) และการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างมวลให้แน่นมากที่สุด (Increase contacts between grains)

ตารางที่ 2-3 ขนาดของดินที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นอิฐดินประสาน

คุณสมบัติของดินที่เหมาะสมในการนำมาผลิตอิฐดินประสาน	
คุณสมบัติทางกายภาพ	คุณสมบัติทางเคมี
ปริมาณความชื้นปกติ ร้อยละ 4-6	ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 75-85
การหดตัวทางความยาว (Shrinkage) ไม่เกินร้อยละ 1	เฟอร์ริคออกไซด์ (FeO_3) ร้อยละ 1.5-3.5
ค่าดรรชนี (พิกัด) ความยืดหยุ่น (Plastic index) Non-Plastic	อลูมิน่าออกไซด์ (AI_2O_3) เกินร้อยละ 8

3. ส่วนผสม (Mixture contents) และการผสม มีสิ่งควรพิจารณาหลายประการ ดังนี้

ปูนซีเมนต์ ต้องเป็นปูนซีเมนต์ใหม่หรือยังไม่เสื่อมสภาพ มีลักษณะเป็นผงแห้งควรใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (หรืออาจใช้ปูนซีเมนต์ผสมในกรณีของการประหยัด) ที่ได้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ผลทดสอบเบื้องต้นพบว่าอิฐดินประสานจะให้กำลังอัดต่างกันประมาณร้อยละ 20 ที่อายุบ่ม 7 วัน)

ดิน ควรเป็นดินที่มีคุณลักษณะและคุณสมบัติเหมาะสมดังกล่าวมาแล้วควรเป็นดินที่แห้ง ดังนั้นการป้องกันฝนและความชื้นของกองดินวัตถุดิบถือเป็นสิ่งจำเป็น ดินที่นำมาใช้ควรมีความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 4-6 มิฉะนั้นการคลุกเคล้าส่วนผสมจะไม่มีประสิทธิภาพ

น้ำ ควรเป็นน้ำที่สะอาดพอสมควร ปราศจากวัชพืชหรือสิ่งสกปรกเจือปน ไม่มีความเป็นกรดหรือด่างมากเกินไป อินทรียวัตถุ เกลือ และซัลเฟตที่ปนอยู่จะมีผลต่อสุขภาพผู้อาศัยและคุณสมบัติของอิฐมวลเบา

ระยะเวลาในการผสม (Mixing time) ขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องมือและวิธีการที่ใช้ (Equipment & Mixing technique) โดยปกติการใช้เครื่องผสมจะให้ผลดีและประหยัดปูนซีเมนต์กว่าการผสมด้วยมือ โดยปกติสำหรับเครื่องผสมไม่ควรน้อยกว่า 3-4 นาที นับตั้งแต่เริ่มเติมน้ำ (หากน้อยกว่ากำหนดจะทำให้กำลังอัดของอิฐดินประสานต่ำลงจนถึงร้อยละ 20) ในการผสม ให้เติมดินแห้งลงในเครื่องผสมก่อนเติมปูนซีเมนต์ลงไปให้เข้ากันดี การเติมน้ำให้เติมหลังสุดเมื่อพร้อมที่จะเริ่มทำการอัดอิฐดินประสาน

4. การใส่ส่วนผสมเพื่อการอัดอิฐดินประสาน ควรหาปริมาณการเติมให้ได้ความหนาแน่นที่มากเพียงพอและเหมาะสมแก่กำลังของเครื่องหรือการใช้แรงโยกด้วยแรงคน (ประมาณ 6.0-7.0 กิโลกรัมต่อก้อน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องอัด) การเติมส่วนผสมในปริมาณที่สม่ำเสมอเป็นสิ่งจำเป็น

5. ช่วงเวลาการนำส่วนผสมไปใช้งาน (Hold-back time) เป็นอีกเรื่องหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตอิฐดินประสาน หลังจากเติมน้ำในส่วนผสมและคลุกเคล้าเข้ากันดีแล้ว จำเป็นต้องนำไปใช้อัดอิฐดินประสานให้เร็วที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และเริ่มแข็งตัวไปบางส่วนของส่วนผสม โดยปกติควรใช้ส่วนผสมให้หมดภายในครึ่งชั่วโมง การอัดอิฐดินประสานล่าช้าตั้งแต่ 1-2 ชั่วโมง อาจทำให้คุณภาพของอัดอิฐดินประสานลดลงมากกว่าครึ่งเช่นเดียวกับการเติมน้ำเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม แล้วคลุกเคล้าใหม่ภายหลังระยะเวลาดังกล่าว แล้วนำไปอัดอิฐดินประสาน

6. การอัดขึ้นรูป โดยปกติดินส่วนผสมที่ใช้อัดอิฐดินประสานจะมีความหนาแน่น (Density) ประมาณ 1,000-1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ภายหลังการอัดอิฐดินประสานควรมีความหนาแน่นอย่างต่ำประมาณ 1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อิฐดินประสานที่ถูกอัดออกมาแล้ว ควรมีน้ำหนักประมาณ 4.75-5.0 กิโลกรัม และมีความหนาแน่นประมาณ 1,740-1,900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งโดยปกติจะให้ค่าความต้านแรงอัดได้ถึง 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่บ่มอายุ 28 วัน

7. วิธีการบ่ม (Drying method) สามารถจำแนกวิธีการบ่มได้เป็น 4 วิธี ซึ่งให้ผลดีน้อยที่สุดไปหามากที่สุดดังนี้

วิธีที่ 1 การบ่ม โดยทิ้งไว้ในที่โล่ง (Expose to sun and wind)

วิธีที่ 2 การบ่ม ในที่ร่มป้องกันจากแดดและลม (Protected from sun and wind)

วิธีที่ 3 การบ่ม โดยคลุมด้วยกระสอบชื้นและรดน้ำอย่างสม่ำเสมอ (Covered by wet bag)

วิธีที่ 4 การบ่ม โดยควบคุมความชื้นสัมพันธ์ร้อยละ 100 (100 Percent relative humidity)

8. ระยะเวลาในการบ่ม โดยปกติอิฐดินประสานเมื่อบ่มที่อายุ 28 วัน จะสามารถรับกำลังได้ประมาณร้อยละ 60-70 ของกำลังสูงสุดในระยะยาว โดยกำลังอัดหลังจาก 1 ปี จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 40 และเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 ภายใน 1 ปี ดังนั้นจึงควรบ่มประมาณ 28 วัน และอย่างน้อยที่สุด 14 วัน

ดิน

สราวุธ จริตงาม, (2545) ได้ให้ความหมายของดินโดยหมายถึงวัตถุธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลกอยู่บาง ๆ เกิดขึ้นจากผลของการแปรสภาพหรือผุพังของหินแร่และอินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้ากัน ดินเป็นตะกอนวัสดุบนเปลือกโลก ได้แก่ บรรยากาศ น้ำ และสิ่งมีชีวิต เรียกตะกอนวัสดุเหล่านี้ว่าดินก็ต่อเมื่อมีส่วนประกอบของสิ่งมีชีวิต เช่น ซากพืช ซากสัตว์ เข้ามาเกี่ยวข้อง หากเป็นแต่เพียงตะกอนวัสดุที่ไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตก็จะเรียกว่าเรโกลิธ (Regolith) เช่น ผงตะกอนบนดวงจันทร์ ดินมีความสำคัญมากสำหรับสิ่งมีชีวิตบนพื้นโลก ดินดึงธาตุไนโตรเจนและคาร์บอนจากบรรยากาศมาสร้างธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิต ในเวลาเดียวกันสิ่งมีชีวิตเองก็ทำให้หินผุพังกลายเป็นดิน จะเห็นได้ว่า ดิน สิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม มีอิทธิพลซึ่งกันและกันเป็นอย่างมาก

ส่วนประกอบของดิน (Soil phase) มี 3 ส่วนใหญ่ ๆ ส่วนแรกคือ ส่วนที่เป็นเม็ดดินหรือของแข็ง ส่วนที่สองคือ ส่วนที่เป็นน้ำหรือของเหลว และส่วนที่สามคือ ส่วนที่เป็นอากาศหรือก๊าซ

ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดนี้จะมีสัดส่วนมากหรือน้อยเท่าใดต่อมวลดินหนึ่งหน่วยน้ำหนักมวลดินต่อปริมาตรจะเป็นตัวบอกคุณสมบัติและคุณภาพในการรับกำลังของดินนั้น ๆ โดยส่วนประกอบของดินมีรายละเอียดดังนี้

1. เม็ดดินหรือของแข็ง (Solid)

เป็นส่วนที่มีเม็ดดินหรือมวลดินที่เกิดจากการที่หินผ่านกระบวนการทางฟิสิกส์ให้ผุพังแตกสลายหรือจากตะกอนที่ทับถมกันมาซึ่งมีแร่และสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ

2. น้ำ หรือของเหลว (Water)

น้ำ เป็นส่วนประกอบอีกอย่างของดินซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ถ้าช่องว่างระหว่างเม็ดดินเต็มไปด้วยน้ำ เรียกว่า ดินอิ่มตัว (Saturated soil)

3. อากาศหรือก๊าซ (Air)

ถ้าช่องว่างระหว่างเม็ดดินเต็มไปด้วยอากาศเรียกว่า ดินแห้ง (Dry soil) ถ้าช่องว่างระหว่างเม็ดดินเต็มไปด้วยน้ำ และอากาศ เรียกว่า ดินชื้นหรือดินเปียก (Unsaturated หรือ Wet soil)

โครงสร้างของดิน

สราวุธ จริตงาม, (2545) ได้อธิบายโครงสร้างของเม็ดดิน คือ การจัดเรียงตัวตามธรรมชาติตามขนาดและรูปร่างของเม็ดดินรวมทั้งแร่ที่ประกอบกันเป็นเม็ดดิน เนื่องมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของเม็ดดินและแรงดึงดูดของโลก ดังนั้นโครงสร้างของดินเหล่านี้จึงมีผลต่อคุณสมบัติของดิน สามารถแบ่งออกได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

1. โครงสร้างดินแบบเม็ดเดี่ยว (Single-grained structure)

ส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างของพวกทรายหรือตะกอนทรายที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.02 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเม็ดดินตกตะกอนทับถมกันจะเรียงตัวกันแบบเป็นเม็ดต่อเม็ดซ้อนกันอยู่ โดยธรรมชาติจะอยู่ในสภาพหลวม เมื่อดินได้รับน้ำหนักกดทับหรือแรงสั่นสะเทือน จะทำให้โครงสร้างของเม็ดดินขยับตัวอยู่เรียงชิดติดกันจนอยู่ในสภาพแน่น ดินประเภทนี้จึงมีการทรุดตัวสูงมากในทันทีทันใดและจะเริ่มทรุดตัวต่อไปน้อยหรือไม่มีการทรุดตัวเลยหลังจากที่ได้รับน้ำหนักกดทับหรือแรงสั่นสะเทือนแล้ว

2. โครงสร้างแบบรวงผึ้ง (Honeycomb structure)

เป็นโครงสร้างดินตะกอนทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 0.02 มิลลิเมตร เม็ดดินพวกนี้จะตกตะกอนและเกาะติดกันเป็นรูปร่างคล้ายรวงผึ้ง ลักษณะของโครงสร้างนี้จะมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินสูงมากและรับน้ำหนักได้จำกัด ถ้าน้ำหนักที่กระทำต่อมวลดินมีค่ามากพอที่จะทำลายรูปร่างของ

โครงสร้างนี้ได้ ก็จะทำให้โครงสร้างนี้เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างแบบดินเม็ดเดี่ยว และอัตราส่วนช่องว่างก็จะลดลงไปด้วยทำให้เกิดการทรุดตัวมากถ้าก่อสร้างอาคารหรือมีน้ำหนักของโครงสร้างอยู่บนชั้นดินประเภทนี้ก็อาจจะเกิดการพิบัติได้เนื่องจากการลดลงของปริมาตรดินหรือจากการทรุดตัว

3. โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (Dispersed structure)

เป็นโครงสร้างของดินเหนียวมีลักษณะเป็นผลึกแผ่นบาง มีคุณลักษณะที่สามารถดึงดูดน้ำได้ดี ซึ่งเกิดจากการตกตะกอนในน้ำจืดมีคุณสมบัติการยึดเกาะกันด้วยแรงไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical forces) แรงยึดเกาะนี้เรียกว่า แรงเชื่อมแน่น แต่ผลลัพธ์จากประจุไฟฟ้า ของเม็ดดินซึ่งเกิดขณะตกตะกอนทับถมกันเกิดการจัดเรียงตัวแบบ Face to face ได้เป็นโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ

4. โครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculent structure)

เป็นโครงสร้างของดินเหนียวที่เกิดจากการตกตะกอนในทะเล และผลลัพธ์จากประจุไฟฟ้าของเม็ดดินทำให้เมื่อเม็ดดินตกตะกอนและทับถมกันนั้นเกิดการจัดเรียงตัวแบบ Edge to face เม็ดดินจะยึดติดกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างผิวที่จุดสัมผัส ได้เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะและโดยทั่วไปโครงสร้างแบบนี้จะไม่มั่นคงและมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมาก ส่วนการตกตะกอนในน้ำสะอาดจะมีแนวโน้มจะเกิดเป็นทั้งสองแบบก้ำกึ่งกัน

ขนาดของเม็ดดิน

สราวุธ จริตงาม, (2545) ดินประกอบด้วยเม็ดดินขนาดต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับว่าขนาดของเม็ดดินส่วนใหญ่เป็นอย่างไร การแบ่งแยกขนาดเพื่อใช้ในการจำแนกดินออกเป็นรูปแบบต่าง ๆ มีหลายมาตรฐานต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2-4 เม็ดดินจะมีขนาดหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ บางทีก็มีหลายขนาดมารวมตัวกัน ทั้งนี้จะหาขนาดของเม็ดดินได้จากการเขียนรูปกราฟแสดงการกระจายของเม็ดดินนั้น ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเม็ดดินกับจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานหรือการตกตะกอนของเม็ดดิน ซึ่งการกระจายตัวของเม็ดดินสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. ดินที่มีขนาดคละกันดี (Well graded soil) เส้นกราฟจะมีแนวโค้งเรียบอย่างสม่ำเสมอจากด้านหนึ่งไปด้านหนึ่ง ดังเส้น ก. ในภาพที่ 2-7

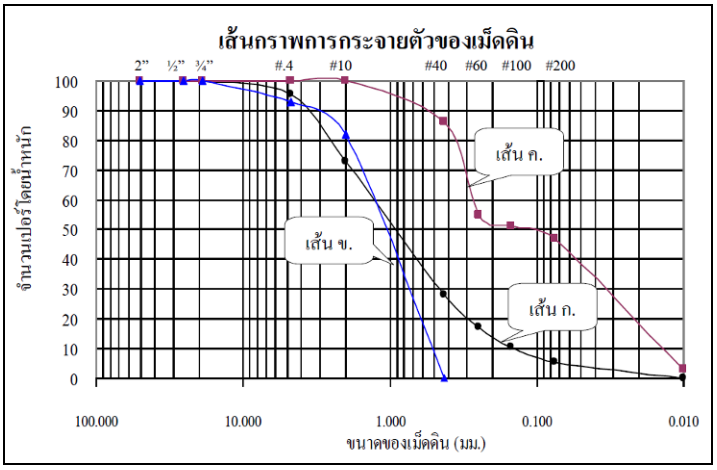
2. เม็ดดินที่มีขนาดคละกันไม่ดี (Pooly graded soil) เส้นกราฟมีแนวโค้งไม่สม่ำเสมอ

3. ดินที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Uniform graded) คือ เม็ดดินจะมีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ ดังกราฟเส้น ข. ในภาพที่ 2-7

4. ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Gap graded) คือ ดินที่มีแต่ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยที่เม็ดดินขนาดปานกลางหายไป หรือขาดขนาดใดขนาดหนึ่งไป เส้นกราฟจะมีลักษณะราบในช่วงที่ขนาดของเม็ดดินขาดหายไป ดังกราฟเส้น ค. ในภาพที่ 2-7

ตารางที่ 2-4 การแบ่งขนาดของเม็ดดิน (สราวุธ จริตงาม, 2545)

ชนิดของดิน	ขนาดของเม็ดดิน (มิลลิเมตร)
กรวด (Gravel)	150-300
ตะกอนทราย (Silt)	2-150
หินขนาดกลาง (Cobble)	0.06-2
ทราย (Sand)	0.002-0.06
ดินเหนียว (Clay)	เล็กกว่า 0.002



ภาพที่ 2-7 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

ศิลาแลง

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, (2557) ได้อธิบายว่าศิลาแลงหรือแม่รังเป็นวัสดุในธรรมชาติอย่างหนึ่ง มีลักษณะคล้ายกับหิน สีแดง ส้ม หรือน้ำตาลเข้ม มีรูพรุนทั่วไป นับเป็นวัสดุที่มีความสำคัญในการก่อสร้างในอดีต เนื่องจากมีความอ่อนนุ่มและมีความแข็งพอสมควร ลักษณะทั่วไปของศิลาแลง ศิลาแลงเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการผุพังมาเป็นระยะเวลายาวนาน มีลักษณะเป็นรูพรุนทั่วไป มีสีสนิมเหล็ก หรือสีอิฐ ส่วนประกอบสำคัญทางเคมีของศิลาแลง คือ ออกไซด์ของเหล็ก หรืออะลูมิเนียม โดยอาจมีแร่ควอตซ์และเคโอลิไนต์ปนอยู่ด้วย ส่วนธาตุที่เป็นด่างและซิลิเกตนั้นมีอยู่น้อยมาก หากมีสารประกอบเหล็กอยู่มากพอ ก็อาจนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อถลุงแร่เหล็กได้ หรือหากมีสารประกอบอะลูมิเนียมมากพอ ก็อาจนำไปถลุงเอาโลหะอะลูมิเนียมได้เช่นกัน

ศิลาแลงเกิดขึ้นได้ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นฝนตกมากแต่แล้งนานด้วย ในฤดูฝนน้ำใต้ดินมีระดับสูงทำให้ท่วมตอนบนของชั้นดิน (ซึ่งต่อไปกลายเป็นศิลาแลง) ระหว่างนั้นน้ำฝนจะละลายเอาสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เอาไว้ เมื่อถึงหน้าแล้ง น้ำใต้ดินลดระดับต่ำลง ก็พาเอาสารประกอบอะลูมิเนียมลงไปสู่ที่ต่ำ เวลานานเข้าวัสดุบริเวณด้านบนจึงมีสารประกอบเหล็กออกไซด์มากขึ้น และมักรวมกันเป็นกลุ่มจึงเกิดเป็นโพรงว่าง เป็นทางให้น้ำใต้ดินซึมขึ้นลงได้ง่ายขึ้นและชะล้างสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ออกไปเร็วด้วย ทำให้ศิลาแลงมีลักษณะเด่น คือ มีรูพรุนทั่วไปและเนื้อเป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์ (FeO) มากกว่าอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ประเภทของศิลาแลง ในประเทศไทยพบศิลาแลง 2 แบบ คือ

1. แบบที่เชื่อมยึดตัวแน่น เป็นแผ่นต่อเนื่องเรียกว่า “ศิลาแลง” หรือ “แม่รัง” นิยมตัดเป็นแท่งคล้ายอิฐ นำไปสร้างสิ่งก่อสร้าง กำแพง ปูทางเดิน
2. แบบที่เกาะตัวกันหลวม ๆ ลักษณะร่วน เรียกว่า “ลูกรัง” นิยมใช้อัดพื้นถนน เพราะเมื่อมีการบดอัด และได้รับความชื้นจากน้ำแล้ว จะจับตัวแน่นดีกว่าดิน หรือทรายธรรมดา

ดินลูกรัง

ดินลูกรังเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศร้อนหรือกึ่งร้อนซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นสูง จึงทำให้พบปริมาณที่มากในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้หรือกลุ่มประเทศอาเซียน มีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ สามารถแข็งตัวได้เมื่อถูกปล่อยให้สัมผัสกับอากาศ มักมีสีแดงเพราะมีออกไซด์ของแร่เหล็กเป็นส่วนประกอบอยู่ คุณสมบัติต่าง ๆ ของดินลูกรังขึ้นอยู่กับชนิดของหินต้นกำเนิด ส่วนประกอบทางเคมีและสภาพภูมิอากาศ ดินลูกรังในประเทศไทยแบ่งตามกระบวนการเกิดได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. Primary lateritic soils หมายถึง ดินลูกรังซึ่งมีแร่เหล็กเป็นส่วนประกอบหลัก เกิดจากการแปรสภาพมาจากแร่ธาตุจำพวกเฟอร์โรแมกนีเซียม (Ferro-magnesium minerals) ที่มีอยู่ในหินชั้นล่างลงไปและมีการเคลื่อนตัวขึ้นมาสะสมในชั้นดิน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน และการทำปฏิกิริยาของน้ำฝนซึ่งมีออกซิเจนและกรดอินทรีย์กับแร่ธาตุจากพวกเฟอร์โรแมกนีเซียม (Ferro-magnesium minerals) ในดิน โดยทั่วไปดินลูกรังประเภทนี้มักจะเกิดเป็นชั้น ๆ จากผิวดินจนถึงชั้นหินเดิม มีคุณสมบัติทางวิศวกรรม คือ ค่าพิกัดอัตเตอร์เบอร์กจะมีค่าต่ำสุดที่ชั้นดินลูกรังและเพิ่มมากขึ้นตามความลึกจนถึงชั้นหินเดิมที่ผุพัง ลักษณะทางกายภาพ มีสีแดง ผิวนอกเป็นเหล็กออกไซด์ที่แข็งกว่าส่วนด้านใน ส่วนด้านในสุดจะเป็นเฟอริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) อ่อน

2. Secondary lateritic soils หมายถึง ดินลูกรังที่เกิดขึ้นโดยการพัดพาของหินเดิมจากน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านและแร่ออกไซด์ที่มีอยู่ จนกลายเป็นดินที่แข็งตัว ดินลูกรังประเภทนี้จะไม่แบ่งชั้น มีการกระจัดกระจายตัวมากกว่าดินลูกรังประเภทแรก มักเกิดล้อมรอบกรวดหรือชิ้นส่วนของหินที่แตกหักทำให้ดินลูกรังประเภทนี้มีขนาดเม็ดใหญ่และมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่แปรปรวน มีค่าพิกัดอัตเตอร์เบอร์กที่ต่ำกว่าประเภทแรก ตะกรันเหล็กโม่ เป็นของเสียที่มีปริมาณมากที่สุดที่ได้จากกระบวนการผลิตเหล็กแบบ Basic oxygen furnace (BOF) และการหลอมเศษเหล็กแบบ Electric arc furnace (EAF) ประเทศไทยนิยมทางอุตสาหกรรมหลอมเศษเหล็กแบบ Electric arc furnace (EAF) เป็นหลัก ทำให้มีตะกรันเหล็กจำนวนมากกว่า 1.5 ล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากความต้องการใช้วัสดุเหล็กที่สูงขึ้นตามการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างและภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ ตะกรันเหล็กโม่ส่วนมากจะประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซิลิกา (SiO_2) และเหล็กออกไซด์ (FeO) เป็นส่วนประกอบหลัก

มาตรฐานสำหรับอิฐดินประสาน

เนื่องจากอิฐดินประสานยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) แต่มีการจัดทำเป็นข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) แทน ได้แก่ มผช. 602/ 2547 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนบล็อกประสาน ซึ่งมีการกำหนดค่ากำลังอัดสำหรับชนิดรับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการกำหนดค่าการดูดกลืนน้ำสูงสุด อยู่ในช่วง 208-288 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของอิฐดินประสาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Donza, Cabrera and Irassar (2002) ได้เสนอสองหัวข้อที่เกิดจากผลกระทบของทรายบดที่มีต่อคอนกรีตกำลังสูง ประการแรกพฤติกรรมของทรายบดมีความสัมพันธ์กับทรายธรรมชาติโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำและปริมาณมวลรวมหยาบและปูนซีเมนต์คงที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมทรายบดต้องการสารลดน้ำเพิ่มขึ้นที่การยุบตัวเท่าเดิมและกำลังอัดยังสูงกว่าคอนกรีตทรายธรรมชาติในทุกอายุบ่มอีกด้วย ประการที่สองศึกษาอิทธิพลของทรายย่อย 3 ชนิด (แกรนิต หินปูนและโดโลไมต์) ที่มีขนาดคละคล้ายกัน วิเคราะห์ส่วนผสมปูนซีเมนต์ 2 แบบ คือ 450 และ 485 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ ผลทดสอบแสดงว่ารูปร่างและความหยาบเป็นผลให้ความสามารถเทได้ของคอนกรีตลดลง แต่กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น และยังพบอีกว่าใช้แกรนิตย่อยมีประโยชน์มากที่สุด

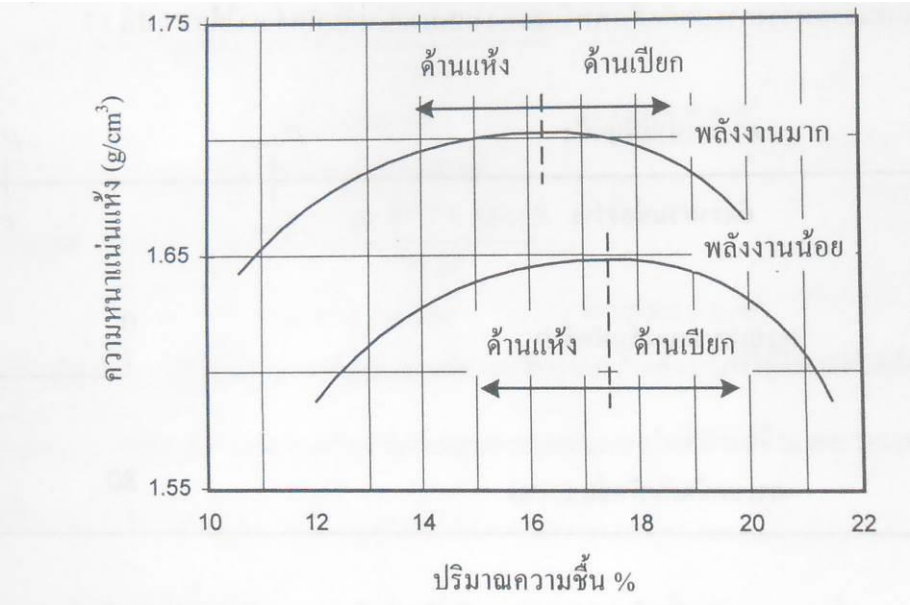
Osunade (2002) ศึกษาโดยการนำแกรนิตละเอียดแทนที่ในอิฐดินประสาน โดยอิฐดินประสาน คือ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นดินลูกรัง ผลทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนผสมต่างกัน (1 : 1 : 2, 1 : 1.5 : 3, 1 : 2 : 4 และ 1 : 3 : 6) ค่ากำลังอัดสูงสุด คือ อิฐดินประสานที่ได้จากการใส่แกรนิตละเอียดร้อยละ 50 นอกจากนี้การเติมแกรนิตละเอียดในอิฐดินประสานให้ผลกำลังดึงลดลง อย่างไรก็ตามกำลังดึงที่ลดลงอยู่ในช่วงพิสัยของค่าคอนกรีตเกรด 30 (1.44-2.0 MPa) ดังนั้นอิฐดินประสานที่ประกอบด้วยแกรนิตละเอียดสามารถใช้ในการก่อสร้างอาคารทั่วไปได้

Khamput (2005) ได้ศึกษาสมบัติของหินฝุ่นทางกายภาพ โดยใช้มาตรฐานเดียวกับการทดสอบมวลรวมละเอียด พบว่าหินฝุ่นมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.68 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ ร้อยละ 0.47 ปริมาณสารอินทรีย์ ซึ่งแสดงค่าความสะอาดเท่ากับเบอร์ 5 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,695 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การพองตัวเท่ากับ ร้อยละ 33.33 ปริมาณดินและผงฝุ่นเท่ากับ ร้อยละ 4.34 ความทนทานต่อการสึกกร่อนโดยซัลเฟตมีค่าร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 5.13 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทรายแล้วมีความใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถนำไปใช้ผสมคอนกรีตแทนทรายได้

Proctor (1930) ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดิน (Typical compaction curve) ดังแสดงในภาพที่ 2-8 ไว้ว่าประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินโดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้าน คือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมากดินจะมีแรงเสียดทานที่สูง เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี่ (Capillary moisture) เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งน้ำจะไปลดแรงคาพิลลารี่และเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกจนน้ำไปสลายแรงเสียดทาน

ได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เต็มช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า “Maximum dry density” และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า “Optimum moisture content (OMC)” หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลงอีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อความชื้นในดินสูงมาก พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป

วุฒินัย กกกำแหง และวิทยา วุฒิจำนงค์, (2550) ได้นำยิปซัมสังเคราะห์ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องผลิตไฟฟ้าดีเซลมาผลิตอิฐดินประสาน ซึ่งยิปซัมสังเคราะห์ได้จากการฉีดน้ำหินปูนทางช่องระบายไอเสีย ผลที่ได้จะทำให้เกิดผลึกยิปซัมสีเทา ในการทดสอบจะใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1 : 5, 1 : 6, 1 : 7, 1 : 8 และ 1 : 9 โดยน้ำหนักและแต่ละอัตราส่วนจะผสมยิปซัมสังเคราะห์ที่ปริมาณร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักน้ำไปอัดขึ้นรูปแล้วบ่มอีก 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่ากำลังของอิฐดินประสานขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสม การแทนที่ยิปซัมเทียมที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดสูงสุด แต่ถ้าผสมยิปซัมเทียมเกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำจะมากขึ้น



ภาพที่ 2-8 กราฟลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (สราวุธ จริตงาม, 2545)

ณิชาดา ฉัตรสถาปัตยกุล, มณฑล วังเวียง และภัทรา เพ่งธรรมกีรติ, (2550) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนเคมีจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตอิฐดินประสาน กากตะกอนเคมีที่นำมาศึกษามีซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) สูง โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับทรายที่สัดส่วน 1 : 2.75 โดยน้ำหนักใช้อัตราส่วนน้ำที่ Optimum moisture content (OMC) ในส่วนของกากตะกอนเคมีจะแทนที่ในปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักทำการบ่มโดยวิธีแช่น้ำและทดสอบกำลังอัดที่ 3, 7 และ 28 วัน จากการทดลองพบว่าการนำกากตะกอนเคมีซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อใช้ในการผลิตอิฐดินประสานสามารถแทนที่ได้ถึงร้อยละ 50 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์หากแทนที่มากกว่านี้กำลังอัดจะลดลง

วุฒินัย กกกำแหง และนรา รัตนวงศ์ (2550) ได้ทำการศึกษาการรับกำลังของอิฐดินประสาน โดยนำหน้าดินจากเหมืองดินขาวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตดินขาวในจังหวัดระนองมาทดแทนปูนซีเมนต์ ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างหน้าดินขาวต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 : 5, 1 : 7 และ 1 : 9 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มโดยวิธีแช่น้ำและทดสอบกำลังอัดที่ 3, 7 และ 28 วัน จากการทดลองพบว่าหน้าดินขาวช่วยเพิ่มกำลังอัดให้อิฐดินประสาน แต่ไม่ควรแทนที่หน้าดินขาวในปูนซีเมนต์เกิน 1 : 9 เพราะจะทำให้กำลังอัดลง

จรูญ เจริญเนตรกุล (2557) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและนำกะลาปาล์มน้ำมันมาแทนที่ดินลูกรังบางส่วน เพื่อผลิตเป็นอิฐดินประสานผสมเถ้าปาล์มและกะลาปาล์ม เปรียบเทียบคุณสมบัติอิฐดินประสานกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/ 2547 ผลการทดลองพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มและแทนที่ดินลูกรังด้วยกะลาปาล์มในอัตราส่วนร้อยละ 5-5, 10-10, 15-15, 20-20, 25-25, 30-30, 35-35 และ 40-40 โดยน้ำหนักของมวลรวมที่ใช้ในการผลิต คือ ดินลูกรัง ปูนซีเมนต์ ทราย เถ้าปาล์ม และกะลาปาล์ม หลังจากอัดเป็นก้อนแล้วนำมาบ่มในอากาศ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบการดูดกลืนน้ำและทดสอบการรับแรงอัด ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณของเถ้าปาล์มและกะลาปาล์มจะทำให้อิฐดินประสานมีอัตราการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น และพบว่าอิฐดินประสานที่ผสมเถ้าปาล์มและกะลาปาล์ม ในอัตราส่วนผสมร้อยละที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของอิฐดินประสานลดลง และเมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/ 2547 พบว่าค่าการรับแรงอัดของอิฐดินประสานผสมเถ้ากะลาปาล์ม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/ 2547 ชนิดไม่รับน้ำหนัก

อาบีดีน ดะแซสาเมาะ, โพซี วาจิ, พารีด๊ะ สาแล และนูรีฮัน แนแซ, (2558)ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ดินลูกรังเพื่อผลิตเป็นอิฐดินประสาน วัสดุผสมที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ ดินลูกรัง เถ้าไม้ยางพารา ทราย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าไม้ยางพาราส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง แต่อัตราการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่ากำลังอัดจากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานอุตสาหกรรม 57-2533 และมาตรฐานอุตสาหกรรม 58-2533 พบว่าอิฐดินประสานที่มีอัตราส่วนของดินลูกรัง : เถ้าไม้ยางพารา : ทราย : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 3 : 2 : 1 : 1 มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นอิฐดินประสานชนิดไม่รับน้ำหนักหรือใช้งานเพื่อการประดับตกแต่ง

วุฒินัย กกกำแหง และวิทยา วุฒิจำนง (2550) ศึกษาการนำยิปซัมมาใช้ในการผลิตอิฐดินประสานโดยการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแห้ง ผลการวิจัยพบว่าการผสมยิปซัมลงในมวลรวม 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถเพิ่มกำลังอัดได้ดีที่สุดและสามารถประหยัดปูนลงได้ 10 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นมูลค่าต่อก้อนประมาณ 0.20 บาท มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นอิฐดินประสานชนิดไม่รับน้ำหนักหรือใช้งานเพื่อการประดับตกแต่ง

เฉลิมชัย มาสีแก้ว และวรชัย โอวิทยากุล (2552) ได้ทำการศึกษาถึงแนวโน้มการเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์หรืออิฐดินประสานโดยวิธีการทดสอบแบบแห้งสลับเปียก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของอิฐดินประสานมีน้ำเป็นตัวกัดกร่อน ซึ่งใช้เกณฑ์พิจารณาจาก 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักและลักษณะทางกายภาพของอิฐดินประสาน จากการทดสอบการเสื่อมสภาพของอิฐดินประสานภายใต้การทดสอบแบบแห้งสลับเปียก พบว่าการสึกกร่อนของอิฐดินประสานใช้น้ำเป็นตัวกัดกร่อน เกิดกระบวนการกัดกร่อนที่แปรผันตรงกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่จะเกิดในลักษณะที่ลดลงแบบค่อยเป็นค่อยไปและต้องใช้ระยะเวลานาน ซึ่งผลการทดสอบทางด้านน้ำหนักพบว่าน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ลดลงโดยแปรผันตรงกับระยะเวลา เกิดการเสื่อมสภาพทางด้านน้ำหนักแบบช้า ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก คือ 4.8 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองของตัวอย่างทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง จำนวนทั้งสิ้น 46 รอบการทดลอง เป็นระยะเวลาในการทดสอบรวมทั้งสิ้น 90 วัน ผลการทดสอบทางด้านกำลังของวัสดุ กำลังรับแรงอัดลดลงเฉลี่ยทั้ง 3 ชุดการทดลองเท่ากับ 7.71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คิดเทียบเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละลดลงเท่ากับ ร้อยละ 7.0 เทียบจากค่ากำลังรับแรงอัดก่อนเริ่มทำการทดสอบและได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของทั้ง 3 ชุดการทดลองภายหลังการทดสอบเท่ากับ 80.29 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลทางด้านการ

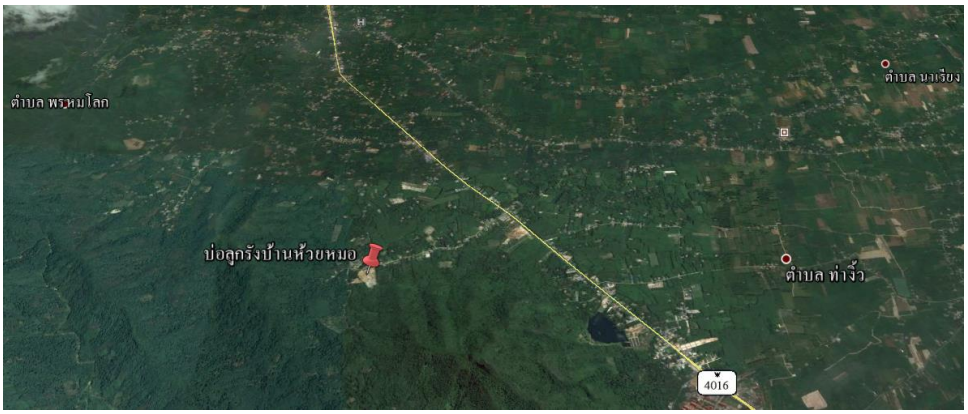
เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของอิฐดินประสานมีดังนี้ เกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณผิวและเนื้อของอิฐดินประสานภายหลังการทดสอบแล้วเสร็จมีจำนวนอิฐดินประสานที่เกิดรอยร้าวประมาณร้อยละ 20 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด เกิดการสึกกร่อนของอิฐดินประสานบริเวณรอบรูเสียบเหล็กเสริมรอยบากและดอกของอิฐดินประสาน สีของอิฐบล็อกประสานมีสีซีดลง

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินงานการศึกษาค้นคว้าอิสระซึ่งประกอบด้วย การเก็บตัวอย่างดินลูกรัง การเตรียมตัวอย่างเศษแก้ว การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลูกรัง ได้แก่ การหาค่าความถ่วงจำเพาะ การหาค่า Optimum moisture content (OMC) ของดินลูกรังโดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน ทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่ทำการบดอัดแบบมาตรฐานโดยใช้ Mini compactor และการหากำลังอัดอิฐดินประสานโดยมีเนื้อหาดังนี้

การเตรียมตัวอย่างดินลูกรัง

การเก็บตัวอย่างดินลูกรังจะทำการเก็บตัวอย่างจากบ่อดินลูกรังบ้านห้วยหมอ สถานที่ตั้งกิโลเมตรที่ 11+400 LT.1.6 กิโลเมตร ทางหลวงหมายเลข 4016 ระหว่างสี่แยกเบญจมราชูทิศกับแยกสถานีตำรวจพรหมคีรี อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช พิกัดละติจูด/ลองติจูดของบ่อดินลูกรัง N 8.480229, E 99.832542 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศของบ่อดินลูกรังห้วยหมอ แสดงดังภาพที่ 3-1 และภาพถ่ายบ่อดินลูกรังแสดงดังภาพที่ 3-2 การเก็บตัวอย่างดินจะใช้พลั่วตักดินใส่กระสอบและปิดปากถุงให้สนิท โดยตัวอย่างดินจะสุ่มเก็บที่ความลึกประมาณ 50 เซนติเมตร เพื่อนำตัวอย่างดินไปทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน การหาค่าความถ่วงจำเพาะ การหาค่า Optimum moisture content (OMC) ของดินลูกรังโดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน ทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่ทำการบดอัดแบบมาตรฐานโดยใช้ Mini compactor



ภาพที่ 3-1 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศของบ่อดินลูกรังห้วยหมอ

ภาพที่ 3-2 สภาพโดยรวมของบ่อดินลูกรังห้วยหมอ

หลังจากเก็บตัวอย่างดินแล้วนำดินตัวอย่างมาผึ่งแดด เพื่อไล่ความชื้นออกบางส่วนเป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน เพื่อลดระยะเวลาการอบในตู้อบ ก่อนนำไปอบจนแห้งสนิทที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อดินแห้งสนิทแล้วนำดินลูกรังที่อบจนแห้งสนิทดังภาพที่ 3-3 ไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ดังภาพที่ 3-4 เพื่อแยกขยะและวัชพืชที่ปะปนมาออก โดยดินที่ผ่านการร่อนจะเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทเพื่อเตรียมนำไปบดละเอียดต่อไป

ภาพที่ 3-3 การอบดินลูกรังในตู้อบ

ภาพที่ 3-4 การร่อนดินลูกรังเพื่อกำจัดเศษวัชพืช

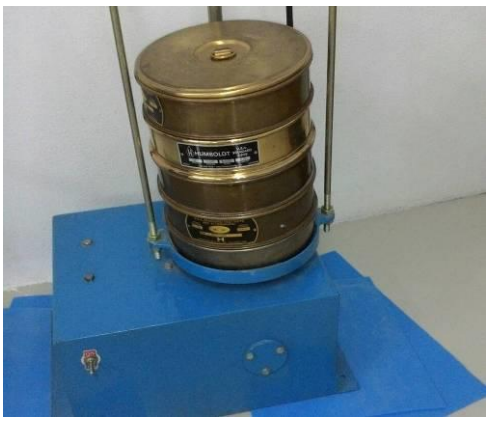
การเตรียมตัวอย่างเศษแก้ว

นำขวดแก้วมาล้างให้สะอาดผึ่งแดดให้แห้งทุบให้แตกนำไปอบจนแห้งสนิทที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการบดเศษแก้วจะใช้เครื่องทดสอบหาความสึกกร่อนลอสแองเจลิส โดยอาศัยการตกกระทบและขัดสีของลูกเหล็กซึ่งส่งผลให้ความคมของเศษแก้วลดลง ดังภาพที่ 3-5 แล้วจึงไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เพื่อคัดแยกเศษแก้วที่ค้างตระแกรงโดยใช้ขนาดตระแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 10 และ 16 ซึ่งมีขนาดช่องตระแกรง 4.75 มิลลิเมตร 2.36 มิลลิเมตร 2.00 มิลลิเมตร และ 0.0469 มิลลิเมตร ตามลำดับดังภาพที่ 3-6 โดยเศษแก้วที่ผ่านการร่อนจะเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทเพื่อเตรียมนำไปทดสอบต่อไป

(ก) เศษแก้วก่อนบดด้วยเครื่องลอสแองเจลิส

(ข) เศษแก้วหลังจากบดแล้ว

ภาพที่ 3-5 การบดเศษแก้ว (ก) (ข)



(ก) การร่อนคัดขนาดด้วยตระแกรงมาตรฐาน

(ข) เศษแก้วที่คัดขนาดแล้ว

ภาพที่ 3-6 การคัดขนาดเศษแก้ว (ก) (ข)

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรัง

การหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินทำได้โดยใช้ขวด Pycnometer ขนาด 500 มิลลิลิตร โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ล้างขวด Pycnometer ให้สะอาดเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดที่คอขวด
2. ต้มไล่ฟองอากาศหรือดูดโดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมด

3. เติมน้ำปรับระดับน้ำจนเสมอระดับที่คอขวดพอดี เช็ดภายนอกขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

4. วัดอุณหภูมิของน้ำภายในขวดให้ละเอียด โดยวัดที่หลายระดับ ถ้าอุณหภูมิต่างกันมากให้ตะแคง ขวดแล้วกลิ้งไปมาเพื่อให้ผสมเข้ากันดีทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึกอุณหภูมิที่ถูกต้อง

5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 3 และข้อ 4 โดยให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน (20 ถึง 40 องศาเซลเซียส) ประมาณ 4-5 จุดเป็นอย่างน้อย เช่น ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นต้น

6. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มและอุณหภูมิ

7. นำดินตัวอย่างที่แห้งประมาณ 50 กรัม (ถ้าเป็นดินชื้นต้องเผื่อน้ำหนักความชื้น) ผสมน้ำกลั่นแล้วกวนให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องปั่น (Mixer machine) โดยให้ส่วนผสมไม่เกิน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร

8. เทส่วนผสมน้ำดินลงในขวดหาความถ่วงจำเพาะขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วใช้น้ำกลั่นล้างดินที่ติดในภาชนะผสมลงในขวดหาความถ่วงจำเพาะให้หมดระวังอย่าให้ระดับน้ำเกินขีดวัดปริมาตรที่คอขวด

9. ไล่ฟองอากาศโดยการต้มหรือดูด โดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับขีดที่คอขวด แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องทดลอง

10. ถ้าระดับน้ำลดลงอีก เติมให้เต็มถึงขีด แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำดินในขวด

11. เทแล้วล้างส่วนผสมในขวด (Pycnometer) ลงในถาด นำไปอบให้แห้งเพื่อชั่งหาน้ำหนักดินที่แน่นอนอีกครั้ง

การหาค่า OPTIMUM MOISTURE CONTENT (OMC)

เป็นการทดสอบปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะนำเอาดินลูกรังที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาผึ่งให้แห้ง แล้วค่อย ๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาตรที่พอเหมาะแล้วเริ่มทำการบดอัดในโมล เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อย ๆ อย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดแต่ละครั้งก็จะหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินแห้งกับความชื้น จะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอดซึ่งเรียกว่า “ความหนาแน่นสูงสุด” (Maximum dry density) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า “ความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด” (Optimum water content) เพื่อนำค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมนี้ไปใช้ในการผสมกับดินตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่ทำการบดอัดแบบมาตรฐานโดยใช้ Mini compactor โดยมีขั้นตอนทดสอบดังนี้

1. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของโมลพร้อมทั้งคำนวณหาปริมาตรของโมล
2. ชั่งน้ำหนักของโมลให้ได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
3. ชั่งน้ำหนักดินตัวอย่างที่เตรียมไว้มาอย่างน้อย 4 กิโลกรัม ผสมน้ำลงไป 3%-4% โดยน้ำหนักคลุกเคล้ากันให้ทั่วจนได้ความชื้นของดินสม่ำเสมอกันตลอดดังภาพที่ 3-7
4. ตักดินใส่ในโมลที่ประกอบ Collar และ Base plate แล้วกะแบ่งปริมาตรของดินที่ใส่ให้ได้จำนวน 3 ชั้น เท่า ๆ กัน เมื่อบดอัดเสร็จแล้วขั้นสุดท้ายให้เหลือพ้นส่วนบนของโมลเล็กน้อยประมาณ 1-2 เซนติเมตร

ภาพที่ 3-7 การนำน้ำผสมในดินตัวอย่าง

5. ใช้ Hammer ขนาด 5.5 ปอนด์ Compact ดินในโมลในแต่ละชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง ดังภาพที่ 3-8 และต้องพยายามบดอัดให้ได้ความแน่นของดินในแต่ละชั้นสม่ำเสมอเท่ากันโดยตลอด ขณะบดอัดโมลจะต้องวางบนพื้นคอนกรีตที่เรียบและแข็ง

ภาพที่ 3-8 การบดอัดดินในโมล

ภาพที่ 3-9 ใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินปากโมลออก

6. เมื่อบดอัดครบจำนวนครั้งแล้วถอด Collar ของโมลออก ใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินปากโมลออกและอุดแต่งผิวดินให้เรียบเสมอปาก Mold ดังภาพที่ 3-9 ใช้แปรงปัดทำความสะอาดดินที่ค้างอยู่นอก Mold แล้วถอด Base Plate ออก นำไปชั่งหาน้ำหนักดินในโมลให้ได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

7. ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากโมลแล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง เก็บดินตัวอย่างตามแนวผ่านี้อย่างน้อย 100 กรัม ไปชั่งน้ำหนักและเข้าอบในเตาอบเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นดังภาพที่ 3-10

8. เอาตัวอย่างที่เตรียมไว้มาอย่างน้อย 4 กิโลกรัม แล้วผสมน้ำเพิ่มอีกประมาณ 3% คลุกเคล้ากันให้ทั่วสม่ำเสมอ แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4 ถึง 7 จนกระทั่งน้ำหนักดินในโมลที่ชั่งได้ครั้งสุดท้ายลดลงและอย่างน้อยควรจะเปลี่ยนหรือเพิ่มปริมาณน้ำถึง 5 ครั้ง

ภาพที่ 3-10 เก็บตัวอย่างดินในโมลเพื่อหาค่าความชื้น

ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

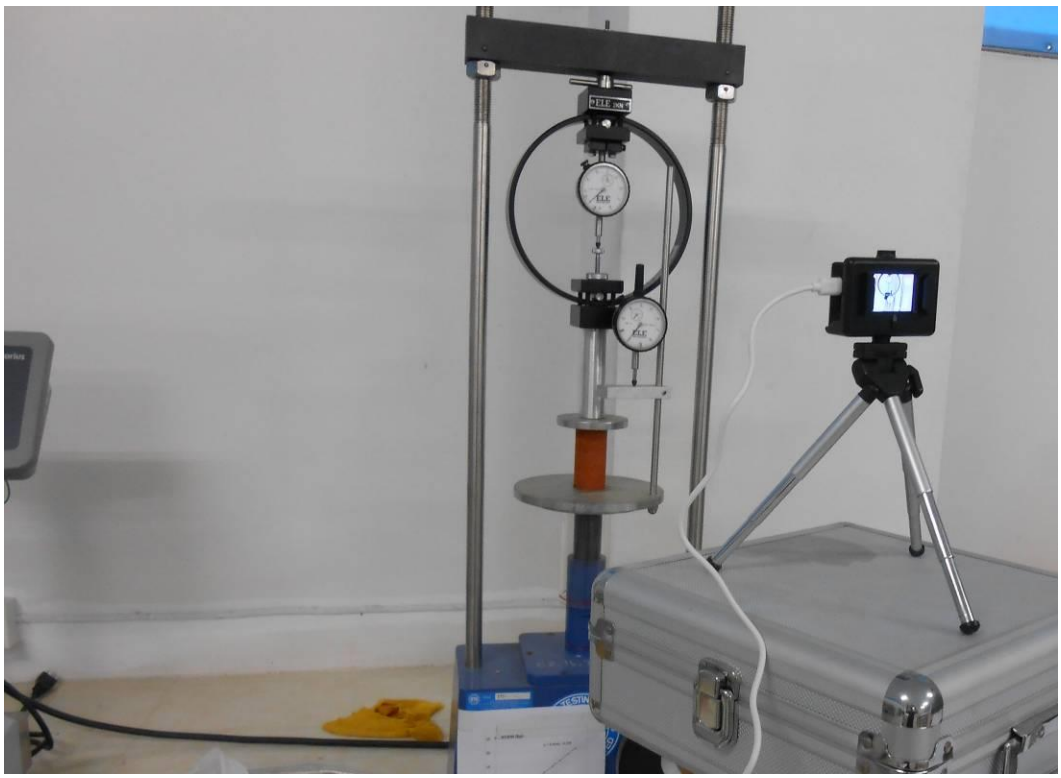
นำดินลูกรังที่เตรียมไว้มาผสมกับน้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม Optimum moisture content (OMC) แล้วทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.80 เซนติเมตร สูง 8.41 เซนติเมตร ปริมาตรเท่ากับ 96.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 698 โดยใช้ Mini compactor น้ำหนักเหล็กกระทุ้ง (Hammer) 0.97 กิโลกรัม ระยะยก 7.5 เซนติเมตร จำนวนชั้นในการกระทุ้ง 4 ชั้น จำนวนครั้งที่กระทุ้งในแต่ละชั้น 20 ครั้ง/ ชั้น ปริมาตรของ Mold และพลังงานในการบดอัดเท่ากับ 6 กิโลกรัม. เซนติเมตร/ ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพที่ 3-11 โดยค่าเปรียบเทียบพลังงานของการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) กับพลังงานที่ได้จากการบดอัดโดยใช้ Mini compactor ดังตารางที่ 3-1

หลังจากได้แท่งตัวอย่างที่บดอัดแล้วนำไปกดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ดังภาพที่ 3-12 เริ่มการกดตัวอย่างโดยอัตราการกด (การเคลื่อนที่ทางแนวดิ่งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 นิ้วต่อนาที (โดยทั่วไปใช้อัตราการกด 0.05 นิ้วต่อนาที) ตามความเหมาะสมในช่วงอ่านต่าง ๆ กัน โดยบันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุก ๆ การยุบตัวของแท่งตัวอย่างดิน 0.005 นิ้วของตัวอย่าง เมื่อแรงในวงแหวนวัดแรงเพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วเริ่มจะลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดิน ให้ยังคงอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือน (Failure plane) บนตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณีที่ไม่มีรอยเฉือนปรากฏชัด เช่น ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ ให้ทดสอบจนการหดตัวถึงประมาณ 0.2 เท่าของความสูงของตัวอย่าง

ตารางที่ 3-1 พลังงานที่ใช้ในการบดอัดโดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) และการบดอัดโดยใช้ Mini Compactor (ธนิต เฉลิมยานนท์, พิพัฒน์ ทองฉิม, สุชาติ ลิ่มกตัญญู, กวิล จันทร์พูล และซารฟาน โต๊ะมีนา, 2548)

ค่าแสดงหรือปริมาณ	Standard proctor	Mini compactor
ปริมาตรของ Mold (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	944	96.4
น้ำหนักเหล็กกระทุ้ง (กิโลกรัม)	2.5	0.97
จำนวนชั้นในการกระทุ้ง (ชั้น)	3	4
จำนวนครั้งที่กระทุ้งในแต่ละชั้น (ครั้ง/ ชั้น)	25	20
ระยะยก (เซนติเมตร)	30.5	7.5
พลังงานในการบดอัด (กิโลกรัม. เซนติเมตร/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	6	6
ปริมาตรของ Mold (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	944	96.4

ภาพที่ 3-11 ส่วนประกอบของ Mini compactor

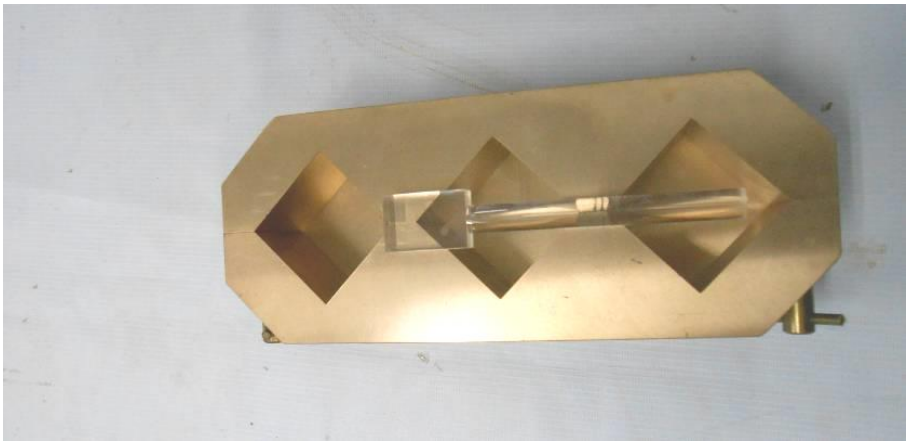


ภาพที่ 3-12 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังอัดอิฐดินประสาน

ในการทดสอบกำลังอัดดินประสานจะใช้แบบหล่อมอร์ตาร์มาตรฐานขนาด 5 x 5x 5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 494 ดังภาพที่ 3-13 ทำความสะอาดแบบหล่อให้สะอาด ขจัดคราบและเศษสิ่งสกปรกที่ติดข้างแบบหล่อด้านในออกให้หมด นำส่วนผสมทั้งหมดประกอบด้วยเศษแก้ว ดินลูกรัง ปูนซีเมนต์และน้ำผสมให้เข้ากัน ใช้เกรียงเหล็กตักส่วนผสมใส่แบบหล่อชั้นแรกโดยมีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนาครึ่งหนึ่ง หนึ่งไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่างในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบ ๆ ละ 8 ครั้ง แต่ละรอบการกระทุ้งจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้งแล้วควรมีความสูงกว่าขอบแบบเล็กน้อย ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าให้เรียบ และเสมอกับขอบแบบหล่อ ภายหลังจากการหล่อตัวอย่างเสร็จเรียบร้อย ให้นำตัวอย่างไปเก็บไว้ในห้องที่มีความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกเพื่อนำก้อนตัวอย่างไปบ่ม หลังจากบ่มจนครบ 7, 14 และ 28 วัน นำก้อนตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดความกว้างความยาวและความสูง แล้วจึงนำตัวอย่างเข้าทดสอบกำลังอัดโดยค่อย ๆ วางแท่นกดให้สัมผัสกับก้อนตัวอย่างแล้วจึงเพิ่มแรงกดขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยอัตราความเร็ว

ของระยะยุบตัวของแท่งกดไม่เกิน 1.25 มิลิเมตรต่อนาที หรือเครื่องกดต้องอ่านค่าแรงกดได้ละเอียดถึง 100 นิวตัน และสามารถควบคุมอัตราการเพิ่มแรงอัดระหว่าง 0.05-0.20 นิวตันต่อตาราง มิลลิเมตรต่อวินาที กดจนกระทั่งก้อนตัวอย่างแตกหรือแรงกดเริ่มตกลง บันทึกค่าแรงกดสูงสุด



ภาพที่ 3-13 แบบหล่อมอร์ตาร์มาตรฐานขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร

การออกแบบส่วนผสม

ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดอิฐดินประสาน จะแบ่งตัวอย่างเป็น 2 ประเภท ประกอบด้วย

ประเภทที่ 1 อิฐดินประสานที่ไม่ผสมเศษแก้วใช้เป็นตัวควบคุม เพื่อเปรียบเทียบผลกำลังอัดอิฐดินประสานที่แทนที่ด้วยเศษแก้ว โดยมีอัตราส่วนผสมของทรายละเอียด : ดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ 45 : 45: 10, 55 : 35 : 10 และ 65 : 25 : 10 โดยน้ำหนักดังตารางที่ 3-2 ในส่วนของน้ำที่ใช้ในการผสมจะใช้ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม Optimum moisture content (OMC) ซึ่งเป็นความชื้นที่ทำให้อิฐดินประสานมีความหนาแน่นสูงสุด แล้วนำไปบ่มที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนผสมในการผลิตอิฐดินประสานเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ

ร้อยละโดยน้ำหนัก			จำนวน (ก้อน)	สัญลักษณ์
ทรายละเอียด	ดินลูกรัง	ปูนซีเมนต์		
45	45	10	3	ไม่ใส่แก้ว_45 : 45
55	35	10	3	ไม่ใส่แก้ว_45 : 45
65	25	10	3	ไม่ใส่แก้ว_45 : 45

ประเภทที่ 2 อิฐดินประสานที่ผสมเศษแก้วมีอัตราส่วนผสมของเศษแก้ว : ดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ 45 : 45 : 10, 55 : 35 : 10 และ 65 : 25 : 10 โดยน้ำหนัก ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนขนาดเศษแก้วที่ค้างตระแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 10 และ 16 ซึ่งมีขนาดช่องตระแกรง 4.75 มิลลิเมตร 2.36 มิลลิเมตร 2.00 มิลลิเมตร และ 0.0469 มิลลิเมตร ตามลำดับดังตารางที่ 3-3 โดยใช้น้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) แล้วนำไปบ่มที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จึงนำมาทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ 3-3 อัตราส่วนผสมในการผลิตอิฐดินประสาน

ขนาดของเศษแก้ว	ร้อยละโดยน้ำหนัก			จำนวน	สัญลักษณ์
	เศษแก้ว	ดินลูกรัง	ปูนซีเมนต์	(ก้อน)	
4.75 มิลลิเมตร (ค้างตระแกรงเบอร์ 4)	45	45	10	3	ค้างเบอร์ 4_45 : 45
	55	35	10	3	ค้างเบอร์ 4_55 : 35
	65	25	10	3	ค้างเบอร์ 4_65 : 25
2.36 มิลลิเมตร (ค้างตระแกรงเบอร์ 8)	45	45	10	3	ค้างเบอร์ 8_45 : 45
	55	35	10	3	ค้างเบอร์ 8_55 : 35
	65	25	10	3	ค้างเบอร์ 8_65 : 25
2.00 มิลลิเมตร (ค้างตระแกรงเบอร์ 10)	45	45	10	3	ค้างเบอร์ 10_45 : 45
	55	35	10	3	ค้างเบอร์ 10_55 : 35
	65	25	10	3	ค้างเบอร์ 10_65 : 25
0.0469 มิลลิเมตร (ค้างตระแกรงเบอร์ 16)	45	45	10	3	ค้างเบอร์ 16_45 : 45
	55	35	10	3	ค้างเบอร์ 16_55 : 35
	65	25	10	3	ค้างเบอร์ 16_65 : 25

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังอัด มีดังนี้

1. นำส่วนผสมทั้งหมด ได้แก่ ดินลูกรัง เศษแก้ว ปูนซีเมนต์ และน้ำสะอาด มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่ออกแบบ ดังภาพที่ 3-14
2. ใช้เกรียงผสมปูนซีเมนต์กับดินลูกรังให้เข้ากันก่อนเป็นอันดับแรก ดังภาพที่ 3-15
3. หลังจากนั้นใช้เกรียงผสมเศษแก้วให้เข้ากันเป็นลำดับสุดท้ายดังภาพที่ 3-16

ภาพที่ 3-14 ดินลูกรัง เศษแก้ว ปูนซีเมนต์และน้ำสะอาดที่ชั่งน้ำหนักแล้ว

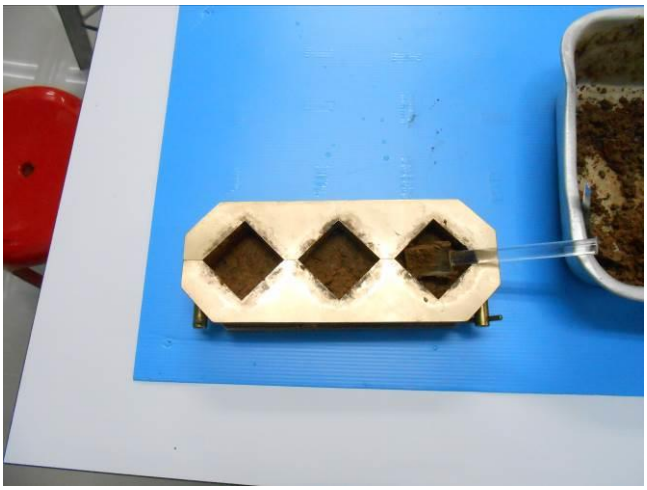
ภาพที่ 3-15 ผสมปูนซีเมนต์กับดินลูกรังให้เข้ากัน

ภาพที่ 3-16 นำเศษแก้วมาผสมให้เข้ากัน

4. ค่อย ๆ เติมน้ำลงไปผสมทีละเล็กน้อย และใช้เกรียงคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากัน ดังภาพที่ 3-17 ในการผสมน้ำลงไปไม่ควรใส่น้ำลงไปให้หมดในครั้งเดียวเพราะจะทำให้การคลุกเคล้าส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันทำได้ยาก

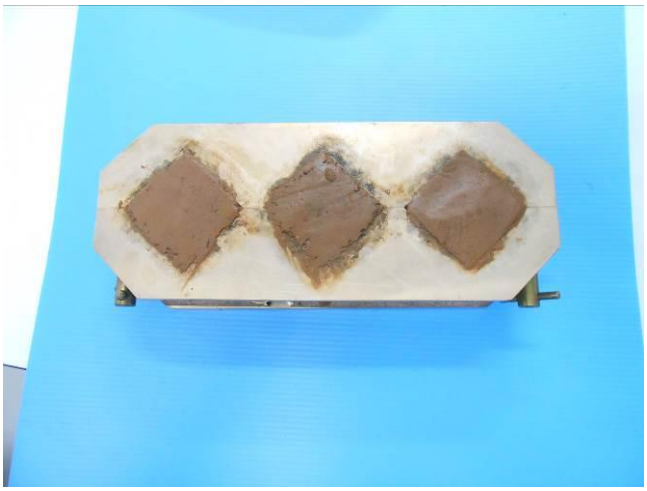
5. ใช้เกรียงเหล็กตักส่วนผสมใส่แบบหล่อชั้นแรก โดยมีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร ใช้ไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่างในเวลา 10 วินาที ดังภาพที่ 3-18

ภาพที่ 3-17 เติมน้ำลงไปคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากัน



ภาพที่ 3-18 การบดอัดส่วนผสมในแบบหล่อ

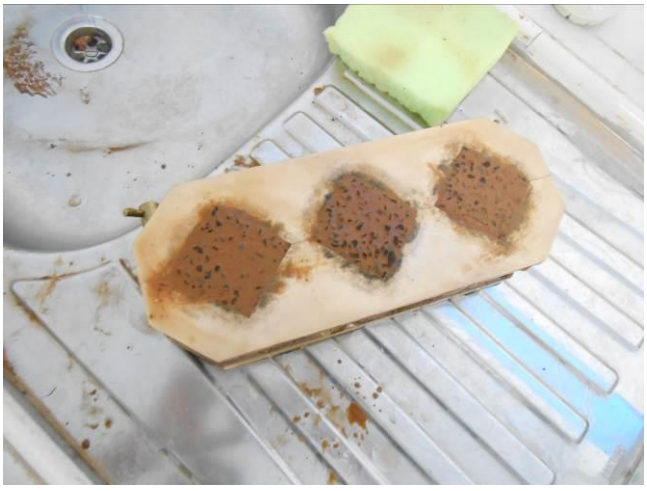
6. หลังจากกระทุ้งจนครบ 3 ชั้น ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าให้เรียบ และเสมอกับขอบแบบหล่อ ภายหลังจากการหล่อตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยดังภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 ปาดผิวหน้าให้เรียบ และเสมอกับขอบแบบหล่อ

7. นำตัวอย่างไปบ่มไว้ในแบบประมาณ 6 ชั่วโมง ให้อิฐเริ่มแข็งตัว

8. ใช้ฟองน้ำชุบน้ำเช็ดผิวด้านบนและด้านล่างของแบบหล่อจนเห็นผิวของเศษแก้ว ดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 ใช้ฟองน้ำชุบน้ำเช็ดผิวด้านบนของแบบหล่อ

8. แกะแบบด้านข้างใช้ฟองน้ำชุบน้ำเช็ดผิวด้านข้างของแบบหล่อจนเห็นผิวของเศษแก้ว ดังภาพที่ 3-211

9. หลังจากเช็ดผิวด้านข้างของแบบหล่อจนเห็นผิวของเศษแก้วทั้ง 6 ด้าน แล้วน้ำตัวอย่างบ่มในร่มเป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำไปบ่มโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน

ภาพที่ 3-21 ใช้ฟองน้ำชุบน้ำเช็ดผิวด้านข้างของแบบหล่อ

การทดสอบกำลังอัดอิฐ

ขั้นตอนในการทดสอบกำลังอัดมีดังนี้

1. นำอิฐที่จะทดสอบกำลังอัดออกมาจากถังบ่มตั้งไว้ในที่ร่มก่อนทดสอบเป็นเวลา 1วัน
2. ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดความกว้างความยาวและความสูงของอิฐแต่ละก้อน
3. ประกอบแท่นกดมอร์ตาร์กับเครื่องทดสอบกำลังอัดดังภาพที่ 3-22 โดยปรับระดับให้สัมผัสกับแป้นกดพอดี
4. ตั้งอัตราเร็วในการเพิ่มแรงกดในการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ 2.42 กิโลนิวตันต่อวินาที ดังภาพที่ 3-23

ภาพที่ 3-22 ประกอบแท่นกดมอร์ตาร์กับเครื่องทดสอบกำลัง

ภาพที่ 3-23 ตั้งอัตราเร็วในการเพิ่มแรงกดในการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์

5. ใส่ตัวอย่างอิฐที่ใช้ในการทดสอบแท่นกดมอร์ตาร์ดังภาพที่ 3-24

6. ปิดฝากับเครื่องทดสอบกำลังอัด ตั้งค่าแรงกดเริ่มต้นเป็น 0 กิโลนิวตัน เริ่มทดสอบกำลังอัดโดยอ่านค่ากำลังอัดสูงสุดจากเครื่องทดสอบ

ภาพที่ 3-24 นำอิฐวางในแท่นกดมอร์ตาร์

การทดสอบความหนาแน่นแห้ง

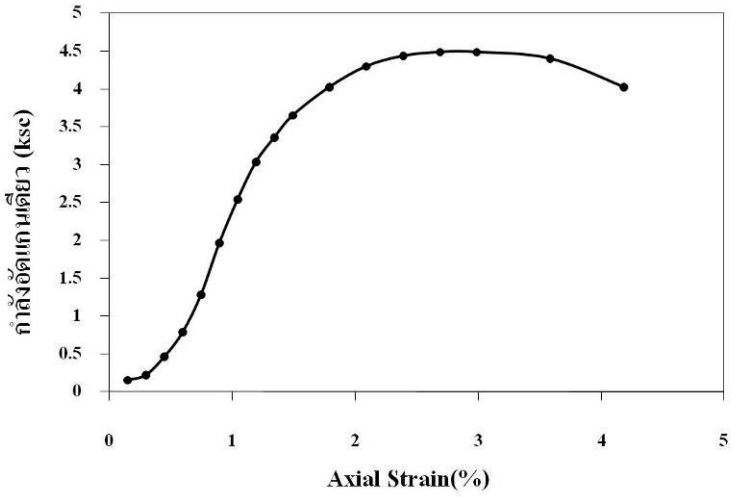
การทดสอบความหนาแน่นแห้งของอิฐเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ การเตรียมอิฐจะใช้อิฐที่หล่อจากแบบทรงลูกบาศก์มาตรฐานขนาด 50 มิลลิเมตร โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนแต่ละด้านไม่เกิน 1 มิลลิเมตร เครื่องมือที่ใช้วัดความยาวต้องมีความละเอียดไม่น้อยกว่า 1 มิลิเมตร และเครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 1 กรัม วิธีการทดสอบเริ่มจากอบอิฐจนแห้งสนิทจนได้น้ำหนักคงที่ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส วัดขนาดมิติทั้งสามด้านและชั่งน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นแห้งได้จากค่าน้ำหนักอิฐหลังอบต่อปริมาตรอิฐ

บทที่ 4
ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยประกอบด้วย ผลการทดสอบด้านกายภาพของดินลูกรัง และสมบัติเชิงกลของอิฐดินประสาน โดยมีผลการทดลองดังนี้

สมบัติทางกายภาพดินลูกรัง

ค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรัง 2.64 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 10.2 กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังมีค่าเท่ากับ 4.40 กิโลกรัม/ ตารางเซนติเมตร ดังภาพที่ 4-1 Modulus of Elasticity (E50) เท่ากับ 313.12 กิโลกรัม/ ตารางเซนติเมตร Strain at failure มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 2.23



ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังกับค่าความเครียด

สมบัติเชิงกลของอิฐดินประสานที่ไม่ผสมเศษแก้ว

ผลกำลังอัดของอิฐที่ใช้ทรายละเอียดโดยไม่ผสมเศษแก้วและมีอัตราส่วนผสมของทรายละเอียด : ดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ 45 : 45 :10, 55 : 35 : 10 และ 65 : 25 : 10 มีกำลังอัดตามตารางที่ 4-1 โดยพบว่ากำลังอัดของอิฐมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยทรายละเอียด และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอายุการทดสอบ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าทรายที่ละเอียดสามารถ

เกิดการแทรกตัวทำให้เกิดการอัดแน่น ที่ทำให้กำลังอัดของอิฐมีแนวโน้มสูงขึ้นได้ โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงร้อยละ 10 และเท่ากันในทุกอัตราส่วนผสม ดังนั้นกำลังอัดที่เกิดขึ้นเกิดจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก ซึ่งเป็นผลให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เป็นตัวเชื่อมประสานที่ให้กำลังกับอิฐเป็นหลัก (วิเชียร ชาลี, 2554) ซึ่งสอดคล้องกับการหล่อคอนกรีตควบคุมโดยใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ผ่านการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดลองกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตควบคุมที่ไม่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ากำลังอัดสูงสุด

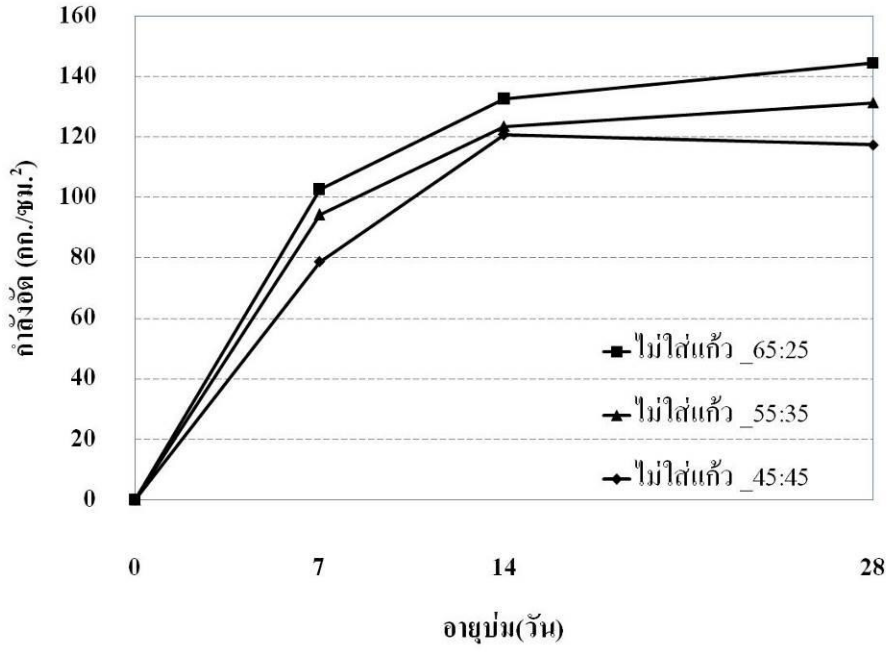
นอกจากนั้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น อาจเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับซิลิก้าหรืออลูมินา ที่มีในดินลูกรังหรือทรายบางส่วนทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ให้กำลังอัดกับอิฐได้อีกทาง โดยปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งสอดคล้องกับ (ณัฐกร แนบทอง และวิเชียร ชาลี, 2555) ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงผสมกับเถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 52.71 และเถ้าถ่านหินมีปริมาณซิลิก้าไดออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ร้อยละ 36.02 และร้อยละ 20.58 ตามลำดับ สารประกอบออกไซด์เหล่านี้มีผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 ถึง 90 วัน สูงขึ้น

โดยภาพรวมแล้วกำลังอัดของอิฐมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นเหมือนคอนกรีตทั่วไป โดยเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นดังที่กล่าวมาข้างต้น (ภาพที่ 4-2) เว้นแต่อิฐที่แทนที่ด้วยทรายละเอียดที่ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก พบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการบ่มโดยการแช่น้ำอาจส่งผลให้อิฐที่มีส่วนผสมของดินลูกรังในปริมาณมากเกิดการบวมตัวโดยดินลูกรังมีอนุภาคที่หยาบมีการดูดน้ำสูงและอาจมีสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่ผสมอยู่ส่งผลให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นวัสดุประสานหลักของอิฐที่ให้กำลังในครั้งนี้ โดยผลดังกล่าวคล้ายกับการใช้มวลรวมที่ไม่สะอาดในคอนกรีตทั่วไป ที่ทำให้กำลังอัดลดลงได้อย่างชัดเจน (สมบูรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ และอดิสรณ์ พงษ์สุวรรณ, 2552) ศึกษาคุณสมบัติของบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทราย หินเกล็ดและตะกอนน้ำประปา ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณของตะกอนน้ำประปาในส่วนผสม มีแนวโน้มทำให้กำลังอัดลดลง ถึงแม้ว่าปริมาณซิลิก้าไดออกไซด์ อลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์จะมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 70 แต่ตะกอนน้ำประปามีสารอินทรีย์และสารเคมีอื่นปนอยู่ หากใช้ในปริมาณมากทำให้

กำลังอัดลดลง ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าทุกส่วนผสมที่ไม่ได้ผสมเศษแก้วให้กำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547 ที่มีการกำหนดกำลังอัดสำหรับชนิดรับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัม/ ตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4-1 ค่ากำลังอัดของอิฐที่ไม่ผสมเศษแก้ว

สัญลักษณ์	กำลังอัด (กก./ ซม.^{2})		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
ไม่ใส่แก้ว_45 : 45	78.8	120.8	117.4
ไม่ใส่แก้ว_55 : 35	94.4	123.6	131.4
ไม่ใส่แก้ว_65 : 25	10.2	132.7	144.5



ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ไม่ผสมเศษแก้วกับอายุบ่ม

สมบัติเชิงกลของอิฐดินประสานที่ผสมเศษแก้ว

อิฐที่ใช้เศษแก้วเป็นส่วนผสมมีอัตราส่วนของเศษแก้ว : ดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ 45 : 45 : 10, 55 : 35 : 10 และ 65 : 25 : 10 ตามลำดับ ผลทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดดังตารางที่ 4-2 โดยค่ากำลังของอิฐมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นเหมือนคอนกรีตทั่วไป

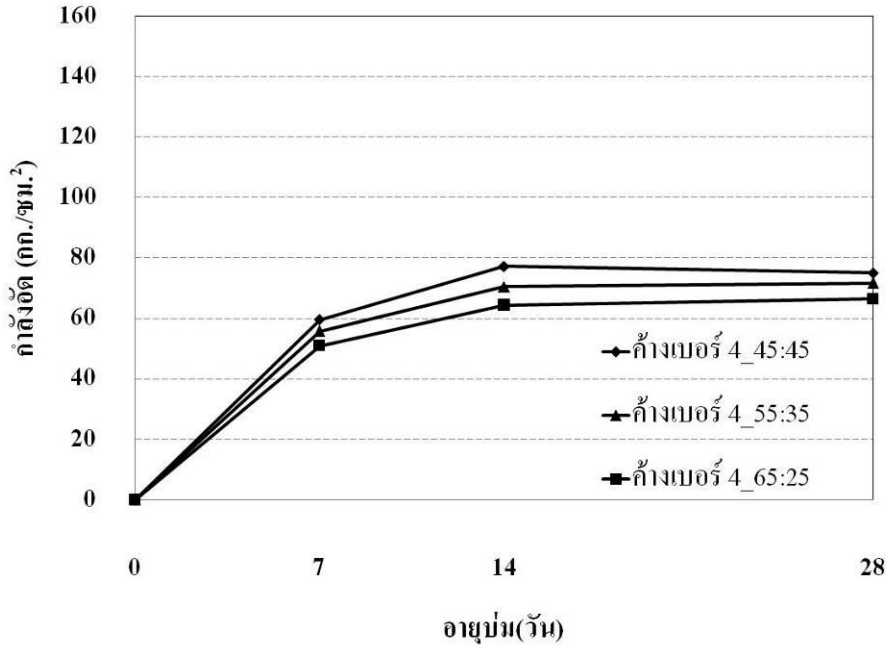
เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่ด้วยเศษแก้วที่ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ขนาดต่าง ๆ ได้แก่ ค้างตะแกรงเบอร์ 4, 8, 10 และ 16 ซึ่งมีขนาดช่องตะแกรง 4.75 มิลลิเมตร 2.36 มิลลิเมตร 2.00 มิลลิเมตร และ 0.0469 มิลลิเมตร ตามลำดับพบว่าการแทนที่เศษแก้วในดินลูกรังในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดอิฐมีแนวโน้มลดลง เช่น อิฐดินลูกรังที่ใช้เศษแก้วที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 ที่แทนที่ดินลูกรังด้วยเศษแก้วร้อยละ 45, 55 และ 65 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 71.5, 71.7 และ 66.4 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-4 ถึงภาพที่ 4-7 โดยผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเศษแก้วเป็นวัสดุที่เป็นผลึกแข็ง เฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดกำลังกับอิฐ ประกอบกับอนุภาคที่ใหญ่ไม่สามารถแทรกตัวที่ทำให้เกิดกำลังอัดได้ (Packing effect) ซึ่งสามารถยืนยันได้อย่างชัดเจนว่าดินลูกรังที่ผสมในอิฐสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้เกิดกำลังอัดได้ เนื่องจากการใช้ดินลูกรังในปริมาณที่ลดลง (เศษแก้วมากขึ้น) ทำให้กำลังอัดของอิฐลดลงได้ และเมื่อพิจารณาผลของความละเอียดของเศษแก้วต่อกำลังอัดของอิฐ พบว่าการใช้เศษแก้วที่มีความละเอียดสูงขึ้น มีผลให้กำลังอัดของอิฐสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอายุการทดสอบ เช่น อิฐดินลูกรังที่แทนที่ดินลูกรังด้วยเศษแก้วที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4, 8, 10 และ 16 ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 75.1, 84.4, 95.7 และ 102.5 ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการแทรกตัวที่ทำให้เกิดกำลังกับอิฐดินลูกรังมีผลค่อนข้างชัดเจน โดยอนุภาคเศษแก้วที่ละเอียดขึ้นสามารถเกิดการแทรกตัวได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของอิฐดินลูกรังมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน แต่ยังให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าอิฐดินประสานที่แทนที่ด้วยทรายละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากเศษแก้วที่ผ่านการบดยังมีอนุภาคที่ใหญ่กว่าทรายค่อนข้างมาก จึงมีผลของ Packing effect ที่ส่งผลต่อกำลังอัดน้อยกว่าทราย ตลอดจนผิวของเศษแก้วเรียบและลื่น ทำให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะซีเมนต์เจลกับผิวเศษแก้วเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์โดยเฉพาะอิฐที่ใช้เศษแก้วค้างตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งเป็นขนาดใหญ่สุดที่ใช้ในการทดลองมีรูปทรงแบนตามความหนาของขวด ดังภาพที่ 4-3

ทุกส่วนผสมที่ใช้เศษแก้วให้กำลังอัดผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547 ยกเว้นอิฐที่ใช้เศษแก้วค้างตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีการแทนที่เศษแก้วร้อยละ 65 มีค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน เพียง 66.4 กิโลกรัม/ ตารางเซนติเมตร มีค่าน้อยที่สุดในทุกอัตราส่วนผสม

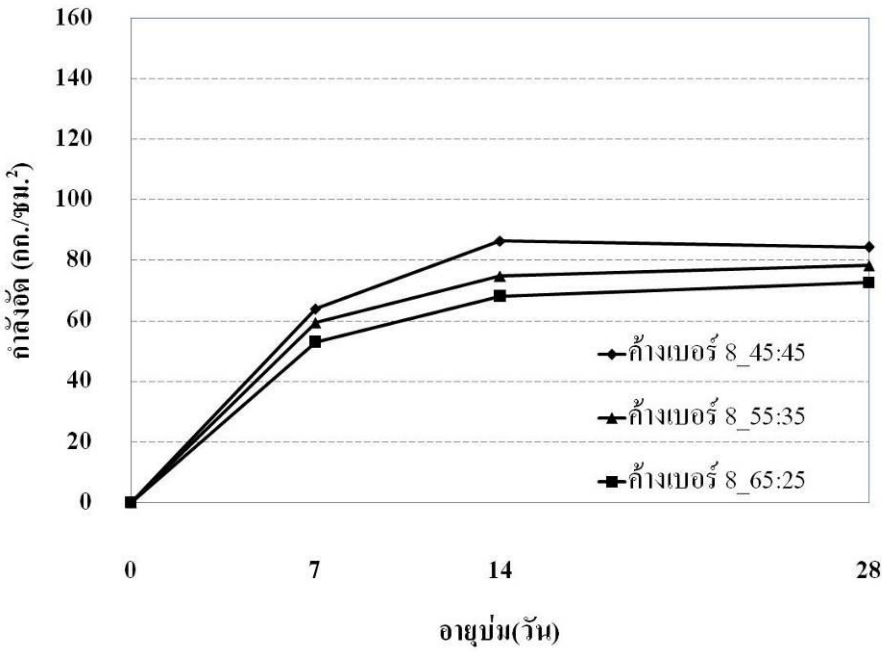
ภาพที่ 4-3 เปรียบเทียบรูปทรงของเศษแก้วที่ค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ

ตารางที่ 4-2 ค่ากำลังอิฐที่ผสมเศษแก้ว

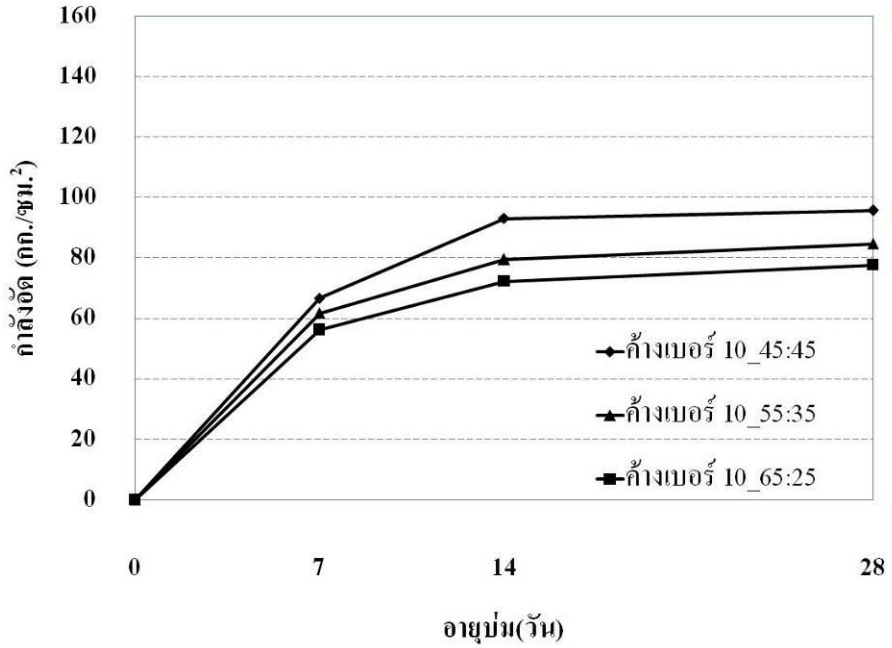
สัญลักษณ์	กำลังอัด (กิโลกรัม/ ตารางเซนติเมตร)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
ค้างเบอร์ 4_45:45	59.6	77.3	75.1
ค้างเบอร์ 4_55:35	55.8	70.5	71.7
ค้างเบอร์ 4_65:25	51	64.4	66.4
ค้างเบอร์ 8_45:45	64	86.4	84.4
ค้างเบอร์ 8_55:35	59.4	74.8	78.3
ค้างเบอร์ 8_65:25	53.1	68.2	72.7
ค้างเบอร์ 10_45:45	66.7	93.1	95.7
ค้างเบอร์ 10_55:35	61.8	79.5	84.7
ค้างเบอร์ 10_65:25	56.3	72.3	77.7
ค้างเบอร์ 16_45:45	74.5	106.5	102.5
ค้างเบอร์ 16_55:35	67.3	90.2	93.4
ค้างเบอร์ 16_65:25	63.7	85.6	89.8



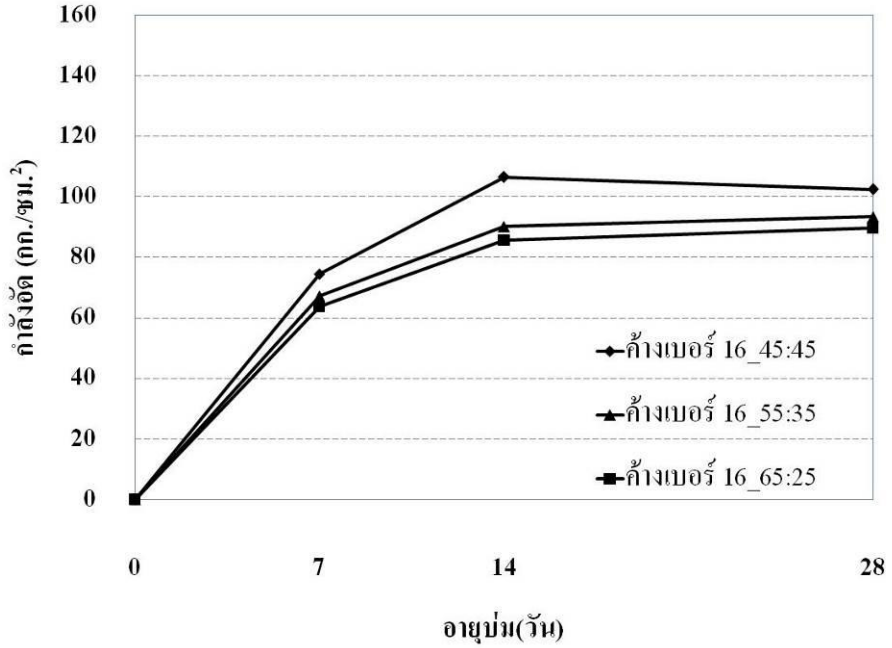
ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 กับอายุบ่ม



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 กับอายุบ่ม



ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 กับอายุบ่ม



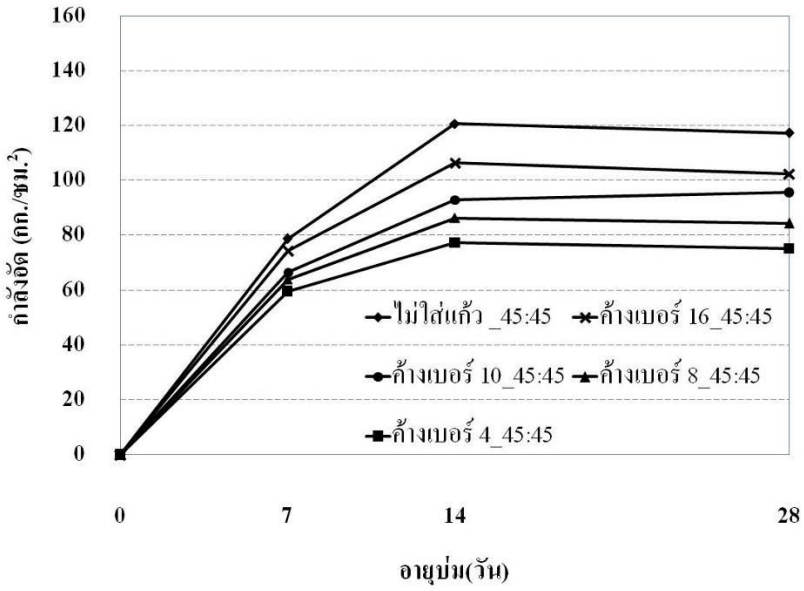
ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 กับอายุบ่ม

เปรียบเทียบกำลังอัดของอิฐที่ผสมเศษแก้วและไม่ผสมเศษแก้ว

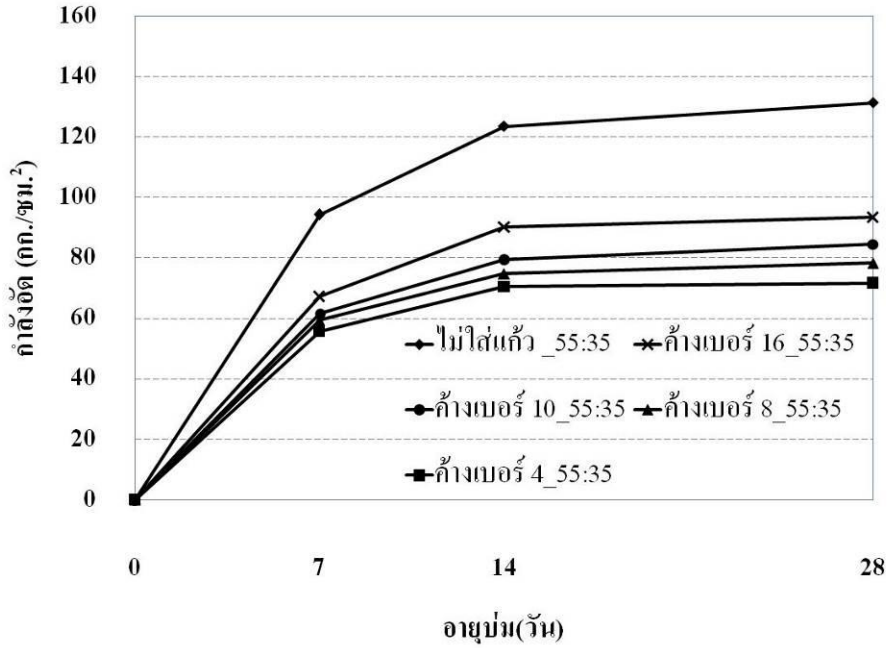
เมื่อพิจารณากำลังอัดอิฐในกลุ่มที่ใช้เศษแก้วกับอิฐที่ใช้ทรายละเอียดเป็นส่วนผสมที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยได้เปรียบเทียบที่อัตราส่วนของเศษแก้วหรือทรายละเอียดที่ร้อยละการแทนที่เท่ากับ 45 ดังภาพที่ 4-8 ถึงภาพที่ 4-10 พบว่าการใช้เศษแก้วแทนที่ทรายละเอียดในการผลิตอิฐทำให้กำลังอัดลดลงมาก โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยเศษแก้วในปริมาณมาก (ร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก) ทั้งนี้เนื่องจากเศษแก้วมีอนุภาคที่ใหญ่กว่าทรายค่อนข้างมาก ทำให้กำลังอัดที่เป็นผลจากการอัดตัวของอนุภาคลดลงอย่างชัดเจน

ในการใช้อัตราส่วนผสมของเศษแก้วหรือทรายละเอียด : ดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ 45 : 45 : 10 ดังภาพที่ 4-8 จากการทดลองที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องมาจากการใช้ดินลูกรังในปริมาณมากถึงร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ทำให้เมื่อบ่มโดยการแช่น้ำเป็นเวลานาน ๆ ดินลูกรังที่มีขนาดเล็กจะเกิดการบวมตัวขึ้น

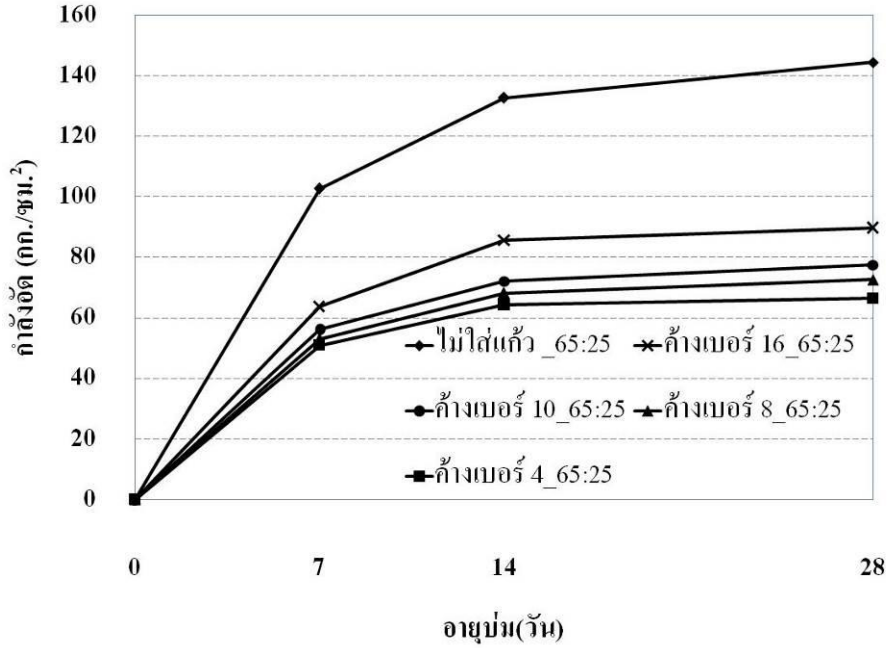
เมื่อพิจารณาแนวโน้มกำลังอัดที่อัตราส่วนผสมเดียวกันแต่เปลี่ยนขนาดของเศษแก้วที่ค้างตะแกรง ผลการทดลองพบว่ากำลังอัดของอิฐลดลงตามขนาดเศษแก้วที่ใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน โดยอิฐที่ใช้เศษแก้วที่ค้างตะแกรเบอร์ 16 เป็นส่วนผสมมีค่ากำลังอัดสูงสุดรองลงมาเป็นเศษแก้วที่ค้างตะแกรงเบอร์ 10, 8 และเบอร์ 4 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-8 กำลังอัดระหว่างอิฐที่ผสมเศษแก้วกับอิฐที่ผสมทรายละเอียดที่ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4-9 กำลังอัดระหว่างอิฐที่ผสมเศษแก้วกับอิฐที่ผสมทรายละเอียดที่ร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก



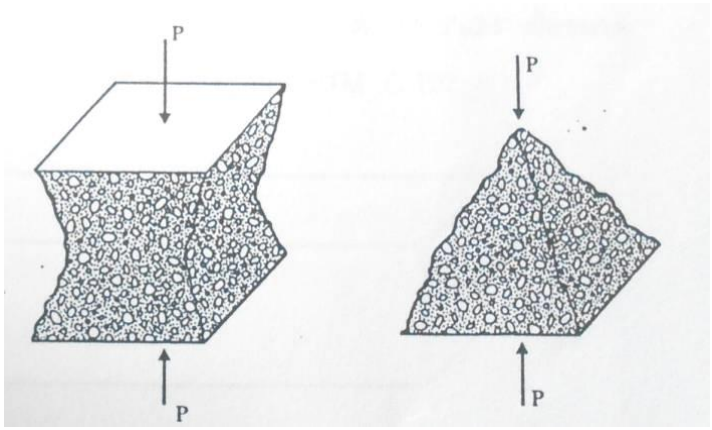
ภาพที่ 4-10 กำลังอัดระหว่างอิฐที่ผสมเศษแก้วกับอิฐที่ผสมทรายละเอียดที่ร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก

ลักษณะการชำรุดแตกหักของแท่งอิฐ

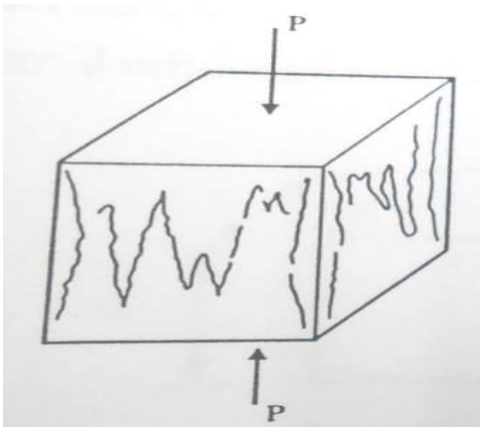
สมพร เหรียญมโนรมย์ (2538) ได้อธิบายลักษณะของแท่งตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่รับแรงอัดจะมีรูปแบบการแตก 2 ลักษณะ คือ

1. การแตกหักแบบรูปพีรามิด การแตกในลักษณะนี้เกิดจากก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่รับแรงอัด มักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear failure) โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของทรงกระบอก ดังแสดงในภาพที่ 4-11 การแตกในลักษณะนี้เกิดในคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง

2. การแตกหักแบบแยกออก การแตกในลักษณะนี้จะแตกตามแนวแรงในลักษณะแยกออกจากกันด้วยแรงดึงในแนวราบดังแสดงในภาพที่ 4-12 การแตกหักในลักษณะนี้เกิดในคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ



ภาพที่ 4-11 การแตกหักแบบรูปพีรามิด



ภาพที่ 4-12 การแตกหักแบบแยกออก

เมื่อพิจารณาการแตกของอิฐแล้วมีลักษณะการแตกหักแบบแยกออก โดยสังเกตรอยแตกเป็นเส้นตรงตามแนวแรงกดอย่างชัดเจนดังภาพที่ 4-13 ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอิฐรับกำลังอัดได้ต่ำ จากการทดลองอิฐมีค่ากำลังอัดระหว่าง 51-102.5 กิโลกรัม/ ตารางเซนติเมตร

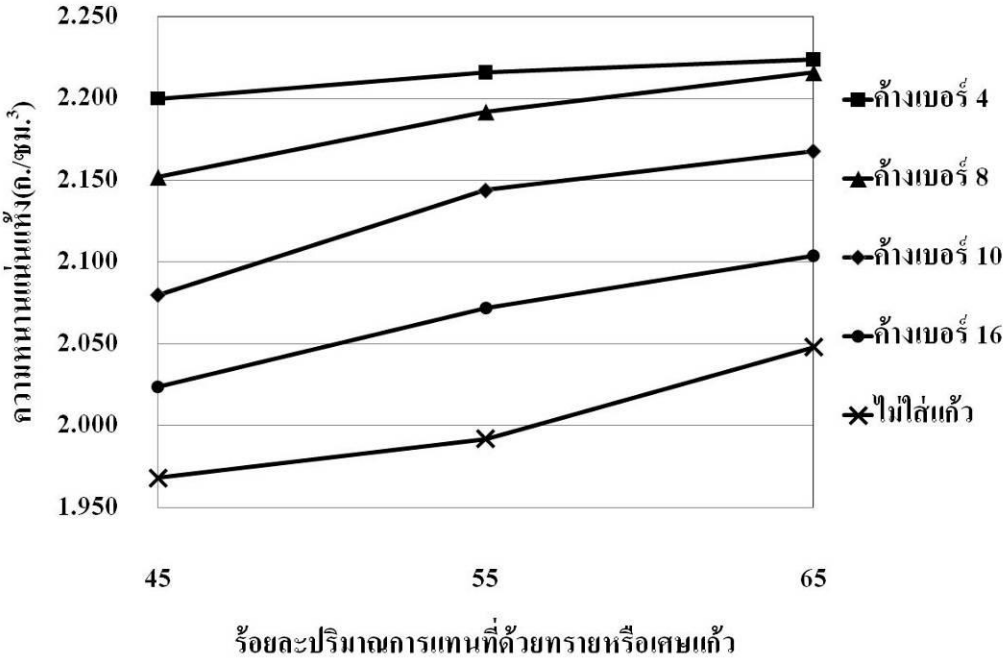
ภาพที่ 4-13 ลักษณะการแตกหักของอิฐ

ความหนาแน่นแห้งอิฐ

ผลความหนาแน่นแห้งของอิฐที่ใช้ทรายละเอียดหรือเศษแก้วและมีอัตราส่วนผสมของทรายละเอียด/ เศษแก้ว : ดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ 45 : 45 : 10, 55 : 35 : 10 และ 65 : 25 : 10 มีความหนาแน่นแห้งตามตารางที่ 4-4 โดยพบว่าความหนาแน่นแห้งของอิฐมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเศษแก้วที่มากขึ้น เช่น อิฐที่แทนที่ดินลูกรังด้วยเศษแก้วที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 มีปริมาณการแทนที่ด้วยเศษแก้วร้อยละ 45, 55 และ 65 ตามลำดับ มีความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 2.2, 2.216 และ 2.224 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อพิจารณาผลของความละเอียดของเศษแก้วต่อความหนาแน่นแห้งของอิฐพบว่า การใช้เศษแก้วที่มีความละเอียดสูงขึ้น มีผลให้ความหนาแน่นแห้งของอิฐลดลงดังภาพที่ 4-14

ตารางที่ 4-3 ค่าความหนาแน่นแห้งอิฐ

สัญลักษณ์	ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ค้างเบอร์ 4_45:45	2.200
ค้างเบอร์ 4_55:35	2.216
ค้างเบอร์ 4_65:25	2.224
ค้างเบอร์ 8_45:45	2.152
ค้างเบอร์ 8_55:35	2.192
ค้างเบอร์ 8_65:25	2.216
ค้างเบอร์ 10_45:45	2.080
ค้างเบอร์ 10_55:35	2.144
ค้างเบอร์ 10_65:25	2.168
ค้างเบอร์ 16_45:45	2.024
ค้างเบอร์ 16_55:35	2.072
ค้างเบอร์ 16_65:25	2.104
ไม่ใส่แก้ว _45:45	1.968
ไม่ใส่แก้ว _55:35	1.992
ไม่ใส่แก้ว _65:25	2.048



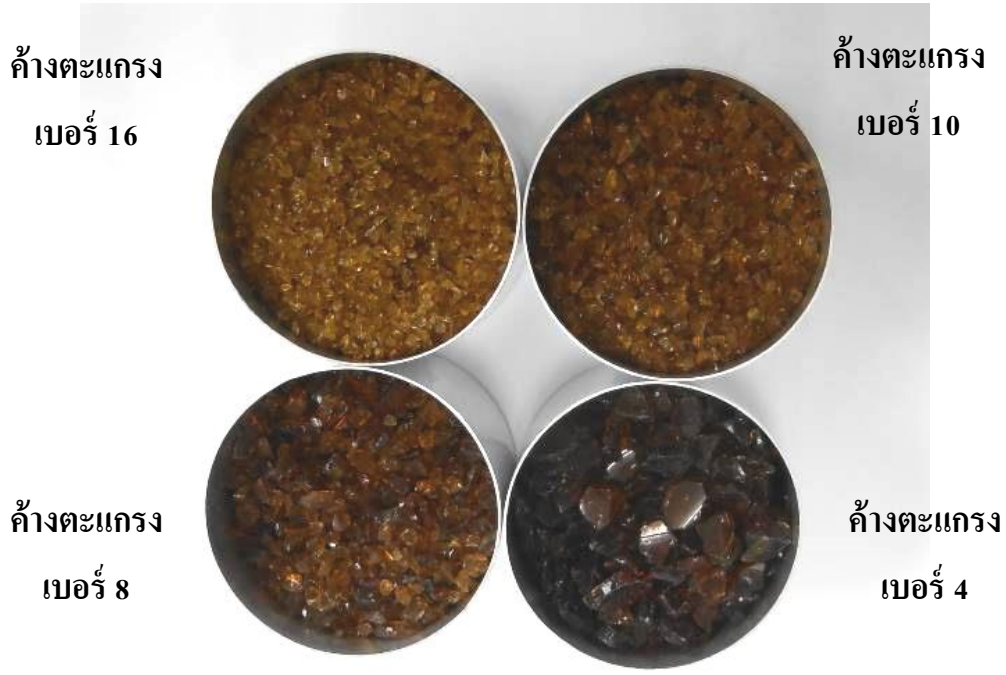
ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิฐแห้งกับปริมาณการแทนที่ด้วยทรายหรือเศษแก้ว

ลักษณะกายภาพอิฐที่ผสมเศษแก้วขนาดต่าง ๆ

ในส่วนนี้ได้กล่าวถึงลักษณะกายภาพของผิวอิฐในด้านความสวยงาม โดยวัตถุประสงค์ของการใช้เศษแก้วในการผลิตอิฐเพื่อให้ผิวอิฐมีความมันวาว จากการสังเกตพบว่า อิฐที่ใช้เศษแก้วที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 และค้างตะแกรงเบอร์ 8 ยังคงลักษณะความวาวของเศษแก้วอยู่ดังภาพที่ 4-15 แต่เมื่อเศษแก้วมีขนาดเล็กลงความวาวของเศษแก้วจะลดลงจนมีลักษณะคล้ายก้อนกรวดธรรมดา ในส่วนของสีเศษแก้ว ขนาดของเศษแก้วแปรตามความเข้มของเศษแก้ว เศษแก้วมีขนาดใหญ่สีก็จะมีความเข้มมากขึ้น ดังภาพที่ 4-16

ดังนั้นขนาดของเศษแก้วที่เหมาะสมจะนำมาใช้ทำอิฐควรมีขนาดอยู่ระหว่าง 9.53 มิลิเมตร ถึง 2.38 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรง 3/ 8 นิ้ว แต่ค้างตะแกรงเบอร์ 8 ซึ่งเป็นขนาดที่ให้สีสันและความแวววาวของแก้วมากที่สุด โดยหากใช้เศษแก้วขนาดใหญ่กว่า 2.38 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว) ถึงแม้ว่าจะบดและขัดสีด้วยลูกเหล็ก เศษแก้วก็ยังมีความคมอยู่ แต่ถ้ามีขนาดเล็กกว่า 2.38 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 8) สีสันและความแวววาวจะลดลงเหมือนเม็ดกรวด

ภาพที่ 4-15 ลักษณะผิวของอิฐที่แทนที่เศษแก้วขนาดต่าง ๆ



ภาพที่ 4-16 ความเข้มของสีเศษแก้วขนาดต่าง ๆ

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

1. สีและความแวววาวของเศษแก้วขึ้นอยู่กับขนาดของเศษแก้ว โดยหากเศษแก้วมีขนาดเล็กลงความวาวและความเข้มของเศษแก้วจะลดลงจนมีลักษณะคล้ายก้อนกรวดธรรมดาขนาดของเศษแก้วที่เหมาะสมจะนำมาใช้ทำอิฐควรมีขนาดอยู่ระหว่าง 9.53 มิลิเมตร ถึง 2.38 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว แต่ค้างตะแกรงเบอร์ 8

2. การใช้เศษแก้วผสมแทนทรายละเอียดในการผลิตอิฐทำให้กำลังอัดลดลง

3. กำลังอัดอิฐที่ผสมเศษแก้วมีค่าลดลงตามขนาดเศษแก้วที่ใหญ่ขึ้น เพราะยิ่งเศษแก้วมีขนาดใหญ่ผิวของเศษแก้วเรียบและลื่นขึ้น โดยเฉพาะเศษแก้วค้างตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งเป็นขนาดใหญ่สุดที่ใช้ในการทดลองมีรูปทรงแบนตามความหนาของขวด

4. เมื่อแทนที่เศษแก้วในดินลูกรังในปริมาณที่มากขึ้นมีผลให้กำลังอัดของอิฐลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอายุการบ่ม

5. ที่อายุบ่ม 28 วัน อิฐที่ผสมเศษแก้วมีกำลังอัดผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547 ยกเว้นอิฐที่ใช้เศษแก้วค้างตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีการแทนที่เศษแก้วร้อยละ 65 มีค่ากำลังอัดเพียง 66.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าน้อยที่สุดในทุกอัตราส่วนผสม

6. ความหนาแน่นแห้งของอิฐมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเศษแก้วที่มากขึ้น และการใช้เศษแก้วที่มีความละเอียดสูงขึ้น มีผลให้ความหนาแน่นแห้งของอิฐลดลง

7. ส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตอิฐดินที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ คือ อัตราส่วนของเศษแก้วที่ค้างตะแกรงเบอร์ 8 ร้อยละการแทนที่ของเศษแก้วเท่ากับ 55 โดยน้ำหนัก เนื่องจากผิวอิฐยังคงลักษณะความวาวของเศษแก้วไว้และมีกำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองเศษแก้วที่เหมาะสมจะนำมาใช้ทำอิฐมีขนาดอยู่ระหว่าง 9.53 มิลิเมตร ถึง 2.38 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว แต่ค้างตะแกรงเบอร์ 8 ซึ่งเป็นขนาดที่เมื่อนำเศษแก้วมาผลิตอิฐแล้วทำให้มีกำลังอัดต่ำ ดังนั้นในการผลิตเพื่อใช้ในเชิงอุตสาหกรรมควรปรับส่วนผสมใหม่ โดยเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์อีกจากเดิมใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เพื่อให้อิฐมีค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน บล็อกประสาน มผช 602/ 2547 ที่กำหนดไว้ว่าอิฐดินประสานต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

บรรณานุกรม

กนกวรรณ ศรสูงเนิน และสุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์. (2551). *การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยความร้อนโดยการทดสอบแบบจำลองขนาดใหญ่.* การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติครั้งที่ 13.

กรมทรัพยากรธรณี. (2554). *ธรณีวิทยาประเทศไทย.*เฉลิมพระเกียติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2542. กรุงเทพฯ. กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี, กระทรวงอุตสาหกรรม.

จรูญ เจริญเนตรกุล. (2557). *อิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมเถ้าและกะลาปาล์มน้ำมัน*. วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต 2. ฉบับที่ 1. มกราคม-เมษายน 2557. หน้า 103-112.

เฉลิมชัย มาสีแก้ว และวรชัย โอวิทยากุล. (2552). *การเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์ภายใต้การทดสอบแบบแห้งสลับเปียก*. สาขาวิศวกรรมโยธา. สำนักวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2545). *คอนกรีตเทคโนโลยี.* พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย อุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน).

ชูชัย สุจิรวกุล และพินัยศักดิ์ พรหมศร. (2553). *บล็อกซีเมนต์ประสานที่ใช้เถ้าแกลบดำ เถ้าแกลบขาว หรือเถ้าชานอ้อย เป็นส่วนผสม*. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 6. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทยร่วมกับศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั้งยืน.

ณัฐกร แนบทอง และวิเชียร ชาลี. (2555). *การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต*. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 : 38-49.

ณิชาดา ฉัตรสถาปัตยกุล, มณฑล วังเวียง และภัทรา เพ่งธรรมกีรติ. (2550). *การผลิตวัสดุก่อสร้างจากวัสดุเหลือทิ้ง*. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทรงพล บุญมาดี.(2529). *ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์*. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นันทชัย ชูศิลป์. (2556). *หน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนผสมกะลาปาล์มน้ำมัน*. วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต 1.

ธนิต เฉลิมยานนท์, พิพัฒน์ ทองฉิม, สุชาติ ลิ่มกตัญญู, กวิล จันทร์พูล และซารฟาน โต๊ะมีนา. (2548). *คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวบดอัดเสริมกำลังด้วยขยะพลาสติก.* การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ครั้งที่ 4. 8-9 ธันวาคม 2548.

บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดัคส์ จำกัด (มหาชน), (ม.ป.ป.). *ขั้นตอนการผลิตอิฐมวลเบาอบไอน้ำแรงดันสูง*. เข้าถึงได้จาก https://qcon.co.th/knowledge,

บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดัคส์ จำกัด (มหาชน), (ม.ป.ป.). *กระบวนการอบไอน้ำแรงดันสูง*. เข้าถึงได้จาก https://qcon.co.th/knowledge.

บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน). (2548). *ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน*. กรุงเทพฯ.

พงศ์พัน วรสุนทโรสถ และวรพงศ์ วรสุนทโรสถ. (2544). วัสดุก่อสร้าง. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชัน.

มณเฑียร กังศศิเทียม. (2539). *กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 7. สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประธานในพระบรมราชูปถัมภ์.

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, (2557). *ศิลาแลง*. เข้าถึงได้จาก https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A8%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%87

วินิต ช่อวิเชียร. (2527). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 1, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วินิต ช่อวิเชียร. (2547). *ปฐพีกลศาสตร์*. พิมพ์ครั้งที่ 3, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิศิษฐ์ อยู่วัฒนา. (2554). *ปฐพีกลศาสตร์*. พิมพ์ครั้งที่ 3, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต.

วุฒินัย กกกำแหง และนรา รัตนวงศ์. (2550). *บล็อกประสานจากหน้าดินขาว*. รายงานการวิจัย. ฝ่ายถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชนบท, กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

วุฒินัย กกกำแหง และวิทยา วุฒิจำนง. (2550). *การประยุกต์ใช้ยิปซั่มในการผลิตบล็อก*ประสาน. เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม 2550.

วิเชียร ชาลี. (2554). *การป้องกันการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้*. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

วิเชียร ชาลี. (2558). *วัสดุประสานชนิดใหม่จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์*. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

วิเชียร ชาลี. (2558). *การปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา* วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 26 ฉบับที่ 3. กันยายน–ธันวาคม 2559.

วิเชียร ชาลี และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2552). *การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา*. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 : 47-55.

ศุภกิจ นนทนานันท์. (2537). *การปรับปรุงคุณภาพดิน*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมบูรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ และอดิสรณ์ พงษ์สุวรรณ. (2552). *บล็อกประสานปูพื้นผสมตะกอนดิน*. ประชุมวิชาการครั้งที่ 1 ปี 2551, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.

สมพร เหรียญมโนรมย์. (2538). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สมมาตร์ สวัสดิ์. (2550). *การปรับปรุงดินคันทางด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในจังหวัดสงขลาและสตูล*.วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สราวุธ จริตงาม. (2545). *กลศาสตร์ของดิน*.พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน. มผช.602/ 2547. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.(2553). *คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก มอก. 57-2533*. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2553). *คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก มอก. 58-2533*. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.

สุกิจ นามพิชญ์และคณะ. (2549). *คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์ เล่มที่ 1*. สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ (สกว.).

สุขสันติ์ หอพิบูลสุข และรุ้งลาวัลย์ ราชัน. (2550). *ปฐพีกลศาสตร์*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: แมคกรอ-ฮิล.

สุรฉัตร สัมพันธารักษ์. (2548). *วิศวกรรมปฐพี*. พิมพ์ครั้งที่ 2.วิศวกรรสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

อภิชัย จุฑาศิริวงศ์. (2546). *สภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินในบริเวณภาคใต้*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อาบีดีน ดะแซสาเมาะ, โพซี วาจิ, พารีด๊ะ สาแล และนูรีฮัน แนแซ. (2558). *อิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมของเถ้าไม้ยางพารา*. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ปีที่ 10. ฉบับที่ 1. มกราคม-มิถุนายน 2558.

ASTM C 109/C109M-98 (1998). Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic *Cement Mortar*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 127-93 (1998). *Standard Test Methods for Specific Gravity and Absorption for Coarse Aggregate*. In Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 128-97 (1998). *Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 187-86 (1998). *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 190-82 (1984). *Standard Test Methods for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortar*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 191-92 (1998). *Standard Test Methods for Time of setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 29/C 29M-97 (1998). *Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 33 (1998). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 596-82 (1998). *Standard Test Methods for Drying Shrinkage of Mortar Containing Portland Cement*. Annual Book of ASTM Standards.

Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2007). *Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cemented paste*, Construction and Building Materials, *21*(7). pp. 1534-1541.

Donza, H., Cabrera, O. & Irassar, E.F. (2002). *High-strength concrete with different fine aggregate*. Cement and concrete Research. *32.* pp. 1755-1761.

Homwuttiwong, S., Chindaprasirt, P. & Jaturapitakkul. C. (2012). *Strength and water permeability of concrete containing various types of fly ashes and filter material*. International Journal of Materials Research, *103*(8). pp.1058-1064.

Hansen, T.C. & Narud, H., (1983), *Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate*. Concrete International – Design and Construction, *5*(1). pp. 79-83.

Khamput, P. (2005). *Properties of Quarry Dust for Use as Fine Aggregate.* Research and Development Journal. The Engineering Institute of Thailand. *2*(16). pp. 33-37.

Osunade, J.A. (2002). Effect *of replacement of lateritic soil with granite fine on the compressive and tensile strengths of laterized concrete*. Building and Environment. *37*. pp. 491-496.

Proctor. (1930). *Design and Construction of Rolled Earth Dams*. EngineeringNews record. *3*. pp. 245-376.

Somna R., Jaturapitakkul C., & Made A.M., (2012), *Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Composite, 2012, 34, 848-854.

Somna R., Jaturapitakkul C., Chalee W., & Rattanachu P., (2012), *Effect of the water to binder ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 16-22.

Sinsiri, T., Kroehong, W., Jaturapitakkul, C. & Chindaprasirt, P (2012). *Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on the compressive strength of blended cement paste*, material and Design, *42*. pp. 424-433.

Sinsiri T., Chindaprasirt P., & Jaturapitakkul C., (2012). *Influence of fly ash fineness and shape on the porosity and permeability of blended cement pastes*, International Journal of Minerals Metallurgy and Materials . *17*(6), 683-690.