

ผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาขยะฟลูอิดไดซ์เบด

EFFECT OF ALKALINE ACTIVATOR ON COMPRESSIVE STRENGTH OF FLUIDIZED BED

FLY ASH CONCRETE

พุมภพ เพ็ชร

พงศกร สังข์น้อย

โครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2560

EFFECT OF ALKALINE ACTIVATOR ON COMPRESSIVE STRENGTH OF FLUIDIZED BED
FLY ASH CONCRETE

Poompob Phetchary

Pongsakorn Sungnoi

AN ENGINEERING PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGRINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGRINEERING
BURAPHA UNIVERSITY 2017

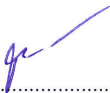
หัวข้อโครงการ	ผลของต่างเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาขยะ
	ฟลูอิดไดซ์เบต
โดย	นายพุมภพ เพ็ชร
	นายพงศกร สังข์น้อย
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. เทียง ชีวะเกตุ
อาจารย์ร่วมที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี
ปีการศึกษา	2560

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

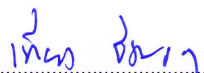

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
(ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.เทียง ชีวะเกตุ)

คณะกรรมการสอบโครงการ


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


.....กรรมการ
(ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรักษ์)


.....กรรมการ
(ดร.เทียง ชีวะเกตุ)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ส่วนผสมในคอนกรีตทดสอบมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหิน ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 100 มม. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง น้ำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 14, 28 และ 60 วัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตระบบไฮดรอลิกส์

ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.25 โมลาร์ การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH มากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานคอนกรีต เนื่องจากให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 27 ที่อายุ 28 วัน

คำสำคัญ: กำลังอัด / ตัวเร่งปฏิกิริยา

Abstract

This study investigated molar were effect of NaOH solution concentration as an alkaline catalyst on compressive strength of fly ash concrete. Fly ash has been used to replace Portland cement type I at the percentage of, 15, 25, 35 , and 50 by weight of cementitious materials. NaOH solution at various concentrations of 0.25, 0.50 , and 0.75 used as alkaline catalyst. Concrete cube specimens with $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ were cast and cured in water. Compressive strengths of concrete specimens were determined 14, 28 , and 60 days.

The results showed that the compressive strength of fly ash concretes tended to increase as NaOH solution concentration reached 0.25 molar. A greater effect of fly ash content on a compressive strength reduction was found in concretes without any NaOH solution. The results also indicated that concrete with NaOH solution concentration of 0.25 molar and 25% fly ash yielded a higher compressive strength by 27% of the control concrete at 28 days.

Keywords: Alkaline Activator / Compressive Strength

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ ที่ปรึกษางานวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี ที่เป็นผู้ให้แนวคิดคำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และช่วยหาแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ และสถานที่ในการทดลองสำหรับงานวิจัย คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ท้ายนี้คณะผู้วิจัยหวังว่า ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะเกิดประโยชน์แก่การศึกษาส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมถ่านหินที่ได้จากการเผาระบบฟลูอิดไดซ์เบด และผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมถ่านหินที่ได้จากการเผาระบบฟลูอิดไดซ์เบด

สารบัญ

	หน้า
หัวข้อโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คอนกรีต	4
2.2 กำลังอัดของคอนกรีต	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก	12
2.4 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลาน	13
2.5 เถ้าถ่านหิน	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3	24
วิธีการศึกษา	24
3.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ	24
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	24
3.3 วิธีการทดสอบ	26
3.4 วิธีการทดลอง	28
บทที่ 4	32
ผลการทดสอบ	32
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน	32
4.2 คุณสมบัติของมวลรวม	38
4.3 การพัฒนากำลังของคอนกรีต	39
4.4 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการรับกำลังอัด	42
4.5 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการรับกำลังอัด	43
บทที่ 5	45
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผล	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สรุปล้างจัยที่มีต่ออิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต	11
รูปที่ 2.2 การแปลงกำลังอัดลูกบาศก์ เป็นกำลังอัดกระบอกมาตรฐาน	12
รูปที่ 2.3 วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ	13
รูปที่ 2.4 วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์	13
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	25
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทดลอง	29
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองการผสมคอนกรีต	30
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ	30
รูปที่ 3.5 คอนกรีตที่พักไว้ในแบบหล่อ 24 ชม.	30
รูปที่ 3.6 การบ่มคอนกรีตในน้ำ	30
รูปที่ 3.7 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	30
รูปที่ 3.8 ก่อนคอนกรีตหลังทดสอบกำลังอัด	30
รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปและสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง เถ้าถ่านหินที่ได้ จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส. โดยตรง (FN-0) และเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่ผ่านการ บดละเอียด (FN-F)	33
รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง	33
รูปที่ 4.3 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ได้จากโรงงานโดยตรง (FN-0)	34
รูปที่ 4.4 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ผ่านการบดละเอียด (FN-F)	34
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุบ่ม	40
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มคอนกรีต	42
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH	43

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลของขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่างต่อค่ากำลังอัด	9
ตารางที่ 2.2 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่อกำลังอัด	9
ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราการกดต่อกำลังอัด	10
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618	18
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ	18
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	26
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมคอนกรีต	27
ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	31
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	36
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	37
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.	38

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อน และกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจในปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในการอุตสาหกรรมคอนกรีต โดยทำการปรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งอัตราของส่วนผสมมีผลต่อคุณสมบัติ และราคาคอนกรีต เหตุนี้ผู้ทำการวิจัยจึงต้องการหาอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ช่วยลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ แต่คุณสมบัติของคอนกรีตยังคงให้ผลลัพธ์ในทางที่ดีหรือใกล้เคียงกันกับส่วนผสมเดิม โดยใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาขยะฟลูอิดไดซ์เบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง

เถ้าถ่านหิน (fly ash) เถ้าถ่านหินได้จากการนำถ่านหินมาใช้ในโรงงานไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้ถ่านหินและได้เถ้าถ่านหินเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตก่อให้เกิดปัญหาเรื่องมลภาวะทางอากาศ ปัจจุบันเถ้าถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้ามีแนวโน้มว่ามีคุณภาพสูงและเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งานมากที่สุดของประเทศไทย แต่ยังมีเถ้าลอยจากแหล่งอื่นๆ ในงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยได้ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า เอ.เอส.ปราจีนบุรี ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าชุมชนที่ผลิตไฟฟ้าเป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาขยะ ฟลูอิดไดซ์เบดระบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นการเผาแบบใช้ความร้อนต่ำ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านหินอยู่ที่ไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ทำให้เถ้าลอยมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงพอ ใช้เป็นวัสดุปูขี้อาสน์ได้แต่อาจไม่ดีเท่าการเผาความร้อนปานกลาง แต่การเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดเริ่มมีใช้มากขึ้นสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานขนาดเล็ก เพราะเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดเนื่องจากมีการพ่นปูนขาวเข้าไปดักจับก๊าซกำมะถันหรือซัลเฟอร์ออกไซด์ ทำให้ลดปริมาณกำมะถันที่ปล่อยออกมาได้ถึงร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังลดปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากถ่านหินได้ด้วย ส่งผลให้เถ้าถ่านหินมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตสูง[5]

ปูนซีเมนต์มีหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ ให้กำลังแก่คอนกรีตแข็งตัว รวมถึงป้องกันการซึมผ่านของน้ำ คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตที่มีราคาสูง การผลิตซีเมนต์ที่นิยมใช้กันเป็นการผลิตแบบแห้ง ไม่ต้องใช้น้ำในการผสมวัตถุดิบ ดังนั้นจึงประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยเฉพาะค่าเชื้อเพลิง วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตคือ หินปูน (Limestone) ที่ได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูน ซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและเกิดการสูญเสียทรัพยากรทางธรรมชาติ

ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับส่วนผสมของคอนกรีตที่ทดแทนอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ หากมีส่วนผสมที่เหมาะสมก็จะส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับแรงได้เหมาะสมกับการใช้งานและเป็นการลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผสมคอนกรีตรวมไปถึงผลกระทบในด้านอื่นๆ จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถ้าถ่านหินมีคุณสมบัติปรับปรุงความสามารถในการเทคอนกรีตเพราะว่าถ่านหินมีอนุภาคที่กลมช่วยในการหล่อลื่นระหว่างอนุภาคของมวลรวมถึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัวได้สูง ในส่วนของกำลังรับแรงอัดนั้น พบว่าทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดต่ำลงและเมื่อผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับปูนซีเมนต์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะแยกซิลิกาและอลูมินา ออกจากถ่านหินและจะช่วยกระตุ้นการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับถ่านหิน ส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

จากข้อความดังกล่าวผู้วิจัยได้ตระหนักและทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการทดลองผลของการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อทดสอบหาคุณสมบัติคอนกรีต อีกทั้งยังเป็นรักษาสีสิ่งแวดล้อมรวมถึงการกำจัดปัญหาถ่านหินที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นผลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับเถ้าถ่านหิน

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ร้อยละ 15, 25, 35 และร้อยละ 50 ของวัสดุประสานที่มีผลต่อการรับกำลังอัดของคอนกรีต

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นในช่วง 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ ที่ใช้เป็นต่างเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการรับกำลังอัดของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้เป็นต่างเร่งปฏิกิริยาต่อความสามารถรับกำลังอัด โดยแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15, 25, 35 และร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เป็นต่างเร่งปฏิกิริยาหล่อตัวอย่างคอนกรีตเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 100 มม. และบ่มตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 14, 28 และ 60 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 การนำวัสดุปอชโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตจะช่วยประหยัดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ ทำให้ลดต้นทุนในการก่อสร้างและลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการผลิต

1.4.2. การนำวัสดุปอชโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้คุณภาพของคอนกรีตดีขึ้น ทั้งด้านกำลังและความทนทานโดยเฉพาะการรับแรงอัด

1.4.3. ใช้เป็นข้อมูลในการประเมินคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในระยะยาว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการรับแรงอัดระยะยาว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อทดสอบปรับคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยการใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมในคอนกรีตแทนปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน

2.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสมเช่น หิน ททราย หรือ กรวด และน้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จ คอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้า ๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่าการไฮเดรชันโดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่าคอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆหลังจากที่ผสม และยิ่งแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดสูง ในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณ 10%ของแรงอัด)

ซึ่งตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุแห่งอเมริกัน (ASTM) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (ม.อ.ก.15) ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทคือ

- 1) ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)
- 2) ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement)
- 3) ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement)
- 4) ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement)
- 5) ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate-resistant Portland Cement) [9]

2.2 กำลังอัดของคอนกรีต

คุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งแรงแล้ว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการ คุณสมบัติของคอนกรีตทั้ง 2 ลักษณะจะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้คุณสมบัติที่แข็งตัวดีแล้ว จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวมีเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

คุณสมบัติคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้แก่ กำลัง ความทนทาน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งในบพนี้ จะกล่าวเพียงกำลังอัดคอนกรีต ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคุณสมบัติด้านกำลัง

2.2.1 ธรรมชาติของกำลังอัดคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

- 1) กำลังอัดของมอร์ต้า
- 2) กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม
- 3) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับผิวของมวลรวม

2.2.1.1 กำลังอัดของมอร์ต้า

กำลังของมอร์ต้ามีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยกำลังของมอร์ต้าขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังและความพรุน จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังมอร์ต้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ปริมาณ กำลัง ลักษณะ ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังตึงน้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนของกำลังตึงต่อกำลังอัดคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีตเพิ่มขึ้น

2.2.1.2 กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังของมอร์ต้าที่กำหนดให้ ความสามารถต้านแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้า แต่โดยทั่วไปกำลังของมวลรวม จะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังมอร์ต้า ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้หินมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลกับมอร์ต้าลดลง

ขนาดมวลรวม จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง

การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลัง รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

2.2.1.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับผิวของมวลรวม

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะของผิวมวลรวม และลักษณะทางเคมี คือ ปฏิกริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อมวลรวม

นอกจากนี้ทิศทางในการหล่อและทิศทางในการให้น้ำหนักจะมีผลต่อกำลังเช่นกัน โดยจะมีผลต่อกำลังดึงมากกว่ากำลังอัดด้วยเหตุผลที่ว่าจะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ต้าต่ำลง

2.2.2 ปัจจัยที่ผลต่อกำลัง

2.2.2.1 คุณสมบัติของวัสดุผสม

1) ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกัน แต่มีความละเอียดแตกต่างกัน อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างกันไปด้วยคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

2) มวลรวม

มวลรวมมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพลสต์ อย่างไรก็ตามมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบ จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องมีปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้เท่ากันดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักจะกำลังดีกว่า ส่วนขนาดผลของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้ขนาดผลมวลรวมที่ไม่เหมาะสม คือมีส่วนที่ละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนผลที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่า ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน

3) น้ำ

น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะเริ่มต้นน้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่ จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2.2.2.2 การทำคอนกรีต

1) การชั่งตวงส่วนผสม

การชั่งตวงส่วนผสม หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนักซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์

2) การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตจะต้องผสมจะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตรวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพลสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้เต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

3) การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น

การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่นจะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะ หากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะลำเลียง หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่เหมาะสม

2.2.2.3 การบ่มคอนกรีต

1) ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถ้ามีความชื้นตลอดเวลา ถ้าซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตไม่มีความชื้นอยู่ คอนกรีตจะไม่มี การเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักจะบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

2) อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะบ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มด้วยความชื้นทันที

3) เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้ยาวนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2.2.2.4 การทดสอบ

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตสำหรับโครงการคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำในรูปของการนำตัวอย่างคอนกรีตสดมาทำก้อนตัวอย่าง โดยถือว่ากำลังของก้อนตัวอย่างเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้าง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตดังต่อไปนี้

ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ การใช้แท่งทดสอบที่ต่างขนาดและต่างลักษณะกันจะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลของขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่างต่อค่ากำลังอัด

ขนาดตัวอย่าง รูปทรง ลูกบาศก์ (ซม.)	กำลังอัด สัมพัทธ์	ขนาดตัวอย่างรูปทรงกระบอก (ซม.)		กำลังอัด สัมพัทธ์
		เส้นผ่านศูนย์กลาง	ส่วนสูง	
7.5	106	5	10	109
10	104	7.5	15	106
15	100	15	30	100
20	95	20	40	97
25	92	30	60	91
		45	90	87
		60	120	84
		90	180	82

นอกจากนี้ ความสูงของก้อนคอนกรีตยังมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่อกำลังอัด

สัดส่วนของความสูงต่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D)	ค่าปรับแก้ของกำลัง
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

วิธีการทำตัวอย่าง การทำให้คอนกรีตแน่น โดยการกระทุ้งด้วยเหล็ก จะทำให้ค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่นโดยการเขย่า

ความชื้นในแท่งทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบถ้าหากแท่งทดสอบมีความชื้นก็จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าแท่งทดสอบที่แห้งกว่า

อัตราการกด ในการทดสอบกำลังอัด ถ้าใช้อัตราการกดสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้การกดที่มาตรฐานกำหนดไว้

ตารางแสดงผลอัตราการกดแสดงในตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราการกดต่อกำลังอัด

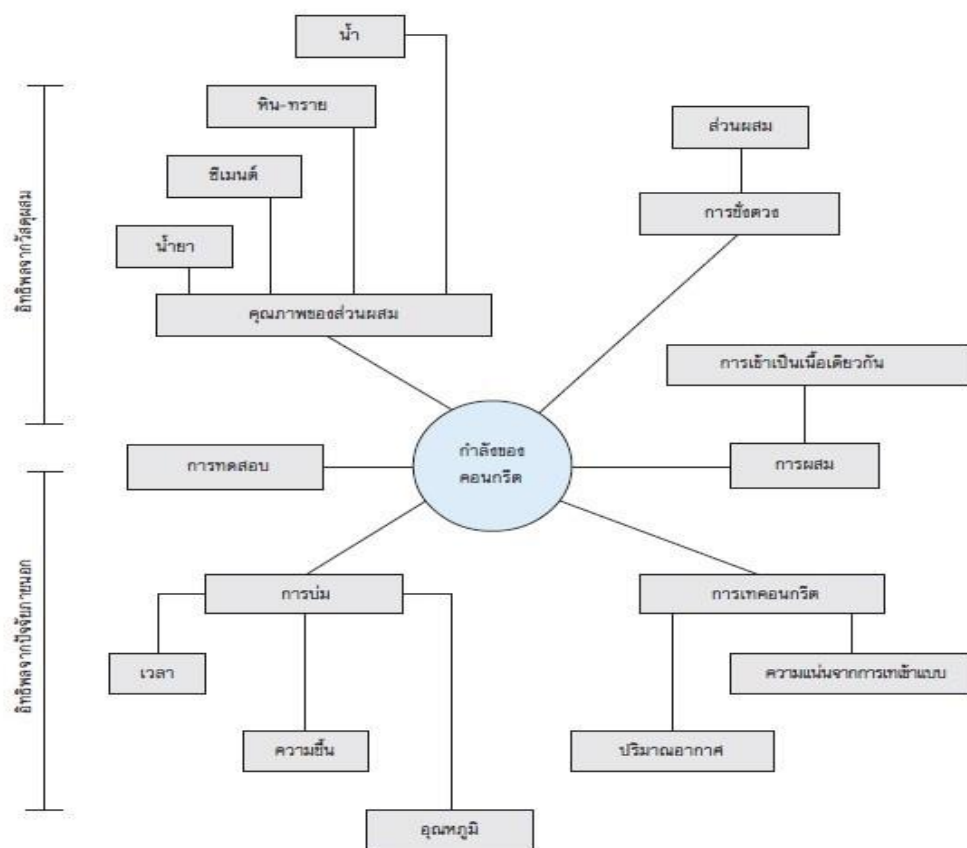
อัตราการกด				เปอร์เซ็นต์ของกำลังเทียบ กับอัตราการทดสอบ มาตรฐาน
นาที	ชั่วโมง	วัน	ปี	
2				100
10				95
30				92
60	1			90
	4	0.17		88
		100		78
		365	1	77
			3	73
			30	69

2.2.2.5 เครื่องทดสอบ

น้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง จึงจะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดได้ดังนี้

- 1) ก้อนตัวอย่างต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลาง และแกนของก้อนตัวอย่างต้องอยู่ในแนวตั้ง
- 2) แผ่นรองกดต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง
- 3) แผ่นรองกดต้องเคลื่อนตัวได้เล็กน้อย
- 4) แผ่นรองกดจะต้องเรียบเป็นระนาบ
- 5) ถ้าต้องใช้วัสดุ Cap ก้อนตัวอย่าง ควรเลือกวัสดุที่มีกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับคอนกรีต

สรุปปัจจัยที่มีต่ออิทธิพลต่อกำล้างของคอนกรีต



รูปที่ 2.1 สรุปปัจจัยที่มีต่ออิทธิพลต่อกำล้างของคอนกรีต

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก

ก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่ทำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มี 2 รูปทรงคือ

1) รูปทรงกระบอก เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา ขนาดที่ใช้คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

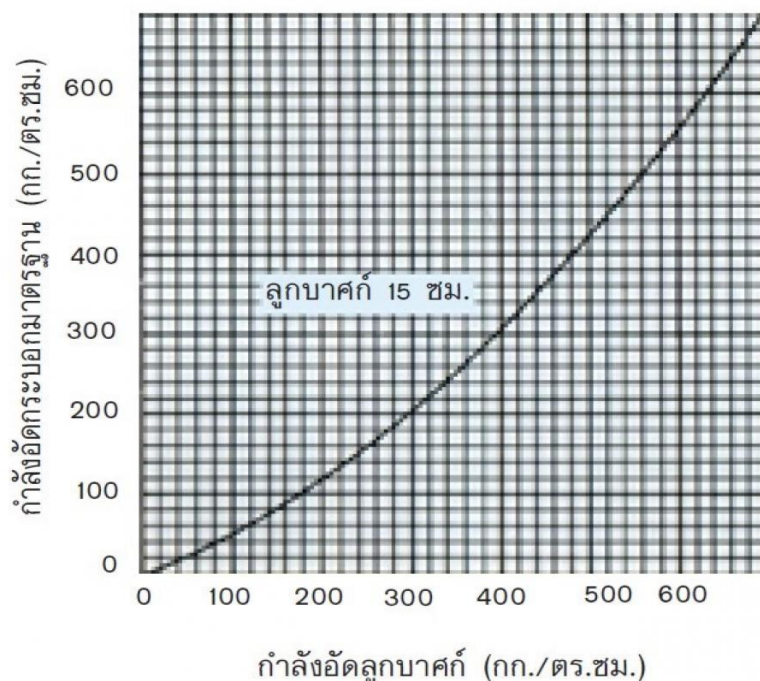
2) รูปทรงลูกบาศก์ เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ ขนาดที่ใช้คือ 15x15x15 ซม.

กำลังอัดของ 2 รูปทรงนี้จะแตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมคอนกรีตเดียวกัน โดยกำลังอัดของรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของรูปทรงลูกบาศก์ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบ

1) แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดก่อให้เกิด Confining Stress ซึ่งจะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของรูปทรงลูกบาศก์ที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง

2) องค์ประกอบความละเอียด กล่าวคือเนื่องจากรูปทรงกระบอกมีความสูงมากกว่าด้านกว้างทำให้ผลด้าน Confining Stress ลดลงอย่างมาก [2]

ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย(มาตรฐาน วสท.) ได้ให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การแปลงกำลังอัดลูกบาศก์ เป็นกำลังอัดกระบอกมาตรฐาน

2.4 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกา และอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca(OH}_2\text{)}$) ทำให้ด้านประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และ ดินขาว (Mata kaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกอนเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น



รูปที่ 2.3 วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ



รูปที่ 2.4 วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์

2.4.1 หลักการทำงานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานเมื่อนำมาผสมปูนซีเมนต์นั้นจะพบได้ว่าปริมาณซิลิกาที่มีอยู่ในปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และอนุภาคที่เล็กของปอซโซลานสามารถแทรกตัว (Filler) เข้าไปในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ ในคอนกรีตนอกจากนี้อนุภาคที่เล็กของปอซโซลานสามารถแทรกตัว (Filler) เข้าไปในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ ในคอนกรีตนอกจากนี้อนุภาคที่เล็กของปอซโซลานสามารถแทรกตัว (Filler) เข้าไปในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ ในคอนกรีต

2.4.2 อิทธิพลของวัสดุปอซโซลาน

อิทธิพลของวัสดุปอซโซลานส่งผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ส่งผลดังต่อไปนี้

1) ความร้อนจากการไฮเดรต (Heat of Hydration) ปฏิกิริยาไฮเดชันนั้นเป็นปฏิกิริยาให้ความร้อนสูงในคอนกรีตผสมจำพวก แก้วฉนวน หรือผงเถ้าตะกั่วหนัก ส่องผลให้ซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยเกิดปฏิกิริยาลดลงซึ่งเมื่อรวมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ค่อนข้างช้า ส่องผลให้ซีเมนต์ที่ผสมเถ้าฉนวนมีการเกิดไฮเดชันที่ต่ำในช่วงแรกและมีผลให้ความร้อนออกมาในปริมาณที่ต่ำกว่าซีเมนต์ปกติ

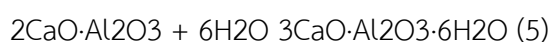
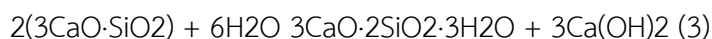
2) ความสามารถในการทำงาน (Workability) ในกรณีของเถ้าฉนวน เถ้าฉนวนมีอนุภาคที่กลมและมีขนาดเล็กกว่าซีเมนต์ อนุภาคที่เล็กและกลมทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวหล่อลื่นเข้าไปแทรกตามช่องว่างหรือรูพรุนภายในคอนกรีตทำให้คอนกรีตที่ผสมปอซโซลานมีความสามารถในการทำงานที่เพิ่มขึ้นและมีความแน่นมากกว่าปกติ

3) พัฒนาการของกำลัง (Strength Development) การผสมวัสดุปอซโซลานลงในคอนกรีตนอกจากจะส่งผลให้ลดจำนวนรูพรุนและช่องว่างของคอนกรีต การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้น และการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตผสมปอซโซลานสูงกว่าคอนกรีตปกติ

4) ความคงทน (Durability) ความสามารถที่เด่นอีกประการหนึ่งคือการต้านทานซัลเฟต การลดลงของ C3A อันเนื่องมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าฉนวนทำให้ความเสี่ยงในการสลายตัวที่รุนแรงที่เกิดจากการแทรกซึมผ่านของซัลเฟตไอออนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาโมโนซัลเฟต (ผลผลิตจาก C3A และยิปซัม) ลดลง หรือในกรณีของการเกิดสนิมเนื่องมาจากการซึมผ่านของคลอไรด์ การลดลงของ C3A ทำให้ประจุคลอไรด์ลดลงรวมถึงการแตกกร้าวลดลง

2.4.3 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H) ดังแสดงใน สมการที่ (3) ถึง (5)



ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (4) และ (5) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (6) และ (7)



ค่า x , y , และ z ในสมการที่ (7) และ (8) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของ C-S-H และ C-A-H ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ [9]

2.5 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีขนาดเล็กและละเอียดมากประกอบด้วยสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน โดยจะปลิวไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งถ้ามีปริมาณเถ้าปลิวมากในชั้นบรรยากาศก็อาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะของอากาศได้ ในกรณีที่เถ้าถ่านหินหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้นทำให้น้ำหนักและตกลงกันเตาจึงได้มีการศึกษาวิจัยโดยการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกก๊าซร้อนและเถ้าปลิวออกจากกัน เพื่อนำเอาเถ้าปลิวกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำเอาเถ้าปลิวมาใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกระบวนการผลิตคอนกรีต เป็นต้น [3]

2.5.1 กรรมวิธีผลิตเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า และ เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังกันเตา เรียกว่า เถ้ากันเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอนหรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินประมาณ 16 เท่า

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ได้แก่

- 1) แอนทราไซต์ (anthracite)
- 2) บิทูมินัส (bituminous)
- 3) ซับบิทูมินัส (sub-bituminous)
- 4) ลิกไนต์ (lignite)

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนสูง ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500 - 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม(Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง ถ้ำถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ถ้ำถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นถ้ำถ่านหินและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ้ำถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นถ้ำถ่านหินซึ่งในระบบการเผาไหม้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ้ำถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใสๆ

การเผาความร้อนปานกลาง อุณหภูมิของการเผาถ้ำถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 – 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ้ำถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ้ำถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นถ้ำถ่านหินที่เหลือน้อยจะเป็นถ้ำถ่านหินหรือถ้ำถ่านหินเตา ถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาไหม้มีประมาณร้อยละ 70-90 มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบซิลิกา เป็นถ้ำถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Combustion)อุณหภูมิของการเผาถ้ำถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ถ้ำถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากถ้ำถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารประกอบซิลิกาได้แต่ไม่ดีเท่าถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ [3]

2.5.2 ชนิดของถ้ำถ่านหิน

1) ชนิด F (Class F) เป็นถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาถ้ำถ่านหินแอนทราไซต์ และ บิทูมินัส มีปริมาณรวมของ ซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และ เฟอริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปถ้ำถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ถ้ำถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ถ้ำถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้ถ้ำถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

2) ชนิด C (Class C) เป็นถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาถ้ำถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ ซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และ เฟอริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 ถ้ำถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า ถ้ำถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ทำให้เม็ดถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2)ต่ำ แล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย [9]

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของถ่านหินออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ และความเป็นปอซโซลานได้ด้วย เนื่องจากถ่านล้อย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำถ่านหินมาใช้งานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 ได้แนะนำว่า ควรใช้ถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และใน Class C ใช้ได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้ถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า ถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าถ่านหิน Class F [4]

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของถ่านล้อยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านล้อยจากแหล่งต่างๆ

ตัวอย่างถ่านล้อย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.5.3 ขนาดและความละเอียดของเถ้าถ่านหิน

อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอนโดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 – 30 ไมครอน เถ้าถ่านหินมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินนิยามคำนวณโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500–5,000 ซม.²/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine)

การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนเถ้าถ่านหินที่คั่งบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณคั่งบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30 [9]

2.5.4 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเถ้าถ่านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 188 เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 – 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เถ้าถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีเถ้าถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเถ้าถ่านหินละเอียด [9]

2.5.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของ ถ่านหิน แต่โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรองนอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LoI) [9]

2.5.6 คุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน

ถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงเถ้าถ่านหินขนาดเล็กสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าจึงมีทรงกลมและผิวเรียบ เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็ก ๆ ที่ผิวและอาจมีปริมาณคาร์บอน(carbon) สูง อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน ความละเอียดของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าที่เหมาะสมซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลน(Blaine) มีความละเอียดอยู่ในช่วง 2500 ถึง 3500 ซม²/ก [9]

2.5.7 การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีต

การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานหรือใช้งานแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเนื่องจากทำให้คอนสามารถเทได้ดีขึ้นและต้องการใช้น้ำลดลง การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น กำลังอัดที่อายุเริ่มต้นของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินแต่จะมีกำลังอัดสูงกว่าเมื่อมีอายุนานมากขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำจนอาจใช้งานไม่ได้ ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพราะทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลง ขณะที่การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินมีค่าใกล้เคียงหรืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินนิยมใช้ในงานคอนกรีตหลายหรือคอนกรีตขนาดใหญ่เพื่อลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งมักใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ค่อนข้างสูงโดยทั่วไปมักสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป [4]

2.5.8 คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหิน

เมื่อนำเถ้าถ่านหินผสมกับซีเมนต์ คอนกรีตที่ได้จะมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมดังต่อไปนี้

1) ความต้องการน้ำ เถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้น และต้องการน้ำลดลงเมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน เถ้าถ่านหินนอกจากลดปริมาณน้ำแล้ว ในหลายกรณียังเพิ่มความสามารถในการทำงานของมอร์ต้าและคอนกรีตได้โดยคงปริมาณน้ำไว้ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้ามาจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มดีขึ้นตามร้อยละของการแทนที่ [4]

2) ระยะเวลาการก่อตัว โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพลสต์ผสมเถ้าถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถ้าถ่านหินที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นและตรงข้ามกันเถ้าถ่านหินที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง ถ้าหากเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณ SO_3 สูงจะมีเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นมากได้ [4]

3) การเยิ้ม น้ำ ถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์จึงทำให้เมื่อผสมเถ้าถ่านหินจะทำให้มีปริมาตรของวัสดุประสานเพิ่มขึ้น มีการเยิ้ม น้ำของเพลสต์และมอดาร์ลดลง การเยิ้ม น้ำของคอนกรีตต่ำกว่าเพลสต์และมอดาร์เนื่องจากมีปริมาณเพลสต์ต่ำกว่า คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจะมีการเยิ้ม น้ำลดลงเช่นกัน เมื่อผสมเถ้าถ่านหินที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากันโดยไม่ลดน้ำ คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้น เนื่องจากมีน้ำอิสระ (free water) มาก การผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ยังทำให้ส่วนผสมเกาะตัวกันได้ดี เป็นผลให้โอกาสในการเกิดการแยกตัว (segregation) ของคอนกรีตน้อยลง [4]

4) โพร่ง การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ขนาดและโครงสร้างของโพร่งเปลี่ยนไป ปฏิกริยาในช่วงต้นขึ้นอยู่กัปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใส่เถ้าถ่านหินทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกริยาไฮเดรชันในช่วงต้นลดลง เป็นผลให้โพร่งของเพลสต์มีมากขึ้นเมื่อเทียบกับเพลสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [4]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Reaksmey Soeurt และ วิเชียร ชาลี ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้เป็นต่างเร่งปฏิกิริยา ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เป็นต่างเร่งปฏิกิริยา หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม³ หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH มากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานคอนกรีต เนื่องจากให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 22 ที่อายุ 28 วัน

สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ , ธนากร ภูเงินชา และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ (2556) เป็นการศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีต่อสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งวัสดุประสานประกอบด้วยเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา และบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 ทุกอัตราส่วนผสมผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 7 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางแร่แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นจะมีความไม่เป็นผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุมีความความแน่นของเพสต์มากขึ้น

สัญญา สอาดกิตินันท์ (Sanchai Sa-ardkitinun)ปิติวัฒน์ วัฒนชัย (Pitiwat Wattanachai) เจษฎา เกษมเศรษฐ์ (Chesada Kasemset) การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะแบบคัดและไม่คัดแยกขนาดโดยปรับปรุงตามมาตรฐานเอซีไอ ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานและขนาดของเถ้าลอย กับกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะ สำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมตามวิธีการของเอซีไอ และเพื่อศึกษาความต้องการน้ำของส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลง เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมด้วยเถ้าลอยแม่เมาะแบบคัดและไม่คัดแยกขนาด ในช่วงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน 0.35 – 0.44 ผลการวิจัย พบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะในปริมาณร้อยละที่เท่ากัน เถ้าลอยแบบคัดแยกขนาดจะลดความต้องการน้ำได้มากกว่าเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกขนาด และความต้องการน้ำจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 25 และ 35 จะให้กำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุสำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วพบว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยแบบคัดแยกขนาดร้อยละ 15-35 จะให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 7 วัน ตั้งแต่ 28 วัน และนอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบคัดแยกขนาดมีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกที่ทุกอายุ จากผลการวิจัย ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะด้วยวิธีการของเอซีไอ และใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่ร้อยละของการแทนที่เท่ากับ 15 25 และ 35 ที่อายุ 1 7 28 และ 56 วัน

รัฐพล สมณา, วิเชียรชาติ (2559) ผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง โดยใช้ต่างในการเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผสมมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.00 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลอมมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม3 เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในน้ำ เป็นเวลา 3 7 14 และ 28 วัน ผลการศึกษา พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูงขึ้นเป็น 1.25 โมลาร์

เจษฎา เกษมเศรษฐ์, ธีระพงษ์ ศรีเจริญ กำลังอัดประลัย การหดตัวแบบแห้ง และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยกองทิ้งที่เหมืองแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ศึกษาหา กำลังอัดประลัย การหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์มอร์ตาร์และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยกองทิ้งที่ได้จากพื้นที่กองทิ้งเส้นลำเลียงหมายเลข 3 ที่เหมืองแม่เมาะ พบว่าการใช้เถ้าลอยกองทิ้งตัวอย่างใด ๆ แทนที่ในปริมาณร้อยละที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้อายุ 7-56 วันมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้นและกำลังอัดที่ได้ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยสดที่การแทนที่และอายุที่เท่ากัน และมีเถ้าลอยกองทิ้งถึง 25 ตัวอย่างจากทั้งหมด 37 ตัวอย่างที่ให้ค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันต่ำกว่า 0.75 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดที่มาตรฐาน ASTM C618 ได้กำหนดให้สำหรับการนำวัสดุปอซโซลานไปใช้งาน ความต้องการน้ำจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 25 และ 35 จะให้กำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุสำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วพบว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยแบบคัดแยกขนาดร้อยละ 15-35 จะให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 7 วัน ตั้งแต่ 28 วัน และนอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบคัดแยกขนาดมีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกที่ทุกอายุ จากผลการวิจัย ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะด้วยวิธีการของเอซีไอ และใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่ร้อยละของการแทนที่เท่ากับ 15 25 และ 35 ที่อายุ 1 7 28 และ 56 วัน

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย วัสดุ และการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

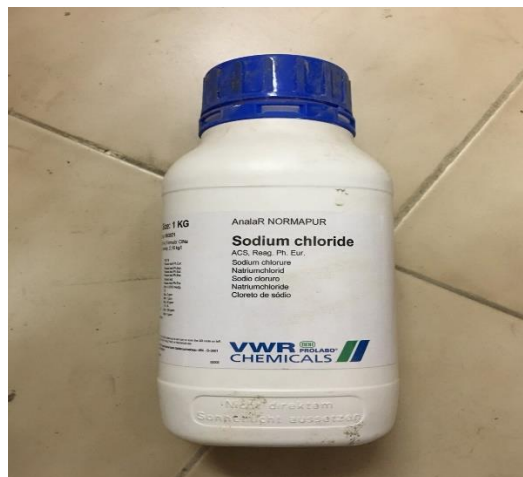
1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตาม มอก.15-2532
2. แก้วถ่านหินที่ได้จากการเผาขยะฟลูอิดไดซ์เบด (ดังแสดงที่รูป 3.1 ก.)
3. มวลรวมหยาบ โดยใช้หินปูน โดยมีขนาดใหญ่เท่ากับ 19 มม.
4. มวลรวมละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 4
5. น้ำประปา
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 0 ,0.25 ,0.50, และ 0.75 โมลาร์ (ดังแสดงที่รูป 3.1 ข.)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐานแบบไฮดรอลิก (ดังแสดงที่รูป 3.1 ค.)
2. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 100 มม. สูง 100 มม. (ดังแสดงที่รูป 3.1 ง.)
3. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (ดังแสดงที่รูป 3.1 จ.)
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก (ดังแสดงที่รูป 3.1 ฉ.)
5. น้ำมันหล่อลื่น
6. เครื่องผสมคอนกรีต



(ก.)



(ข.)



(ค.)



(ง.)



(จ.)



(ฉ.)

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้เป็นต่างเร่งปฏิกิริยา ต่อกำลังอัดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25, 35, 45 และ 55 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้น 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ รวมทั้งหมด 16 ส่วนผสม

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จากสมการ $m = M \times \text{Molar}$

โดยที่ m คือ น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)

M คือ มวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

Molar คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)

2. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ตามปริมาณที่คำนวณมา

3. แบ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ละลายในน้ำ โดยเก็บสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในภาชนะที่เป็นพลาสติก

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ความเข้มข้น(โมลาร์)	NaOH(กก.)
0.25	2.1
0.5	4.2
0.75	6.3

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Mix	Mix proportions (kg/m ³)				
	CCR	Fly ash	Fine Agg.	Coarse Agg.	Liquid
IF15	357	63	810	920	210
IF25	315	105	795	920	210
IF35	273	147	775	920	210
IF50	210	210	755	920	210
IF15 - 0.25 M	357	63	810	920	210
IF15 - 0.50 M	357	63	810	920	210
IF15 - 0.75 M	357	63	810	920	210
IF25 - 0.25 M	315	105	795	920	210
IF25 - 0.50 M	315	105	795	920	210
IF25 - 0.75 M	315	105	795	920	210
IF35 - 0.25 M	273	147	775	920	210
IF35 - 0.50 M	273	147	775	920	210
IF35 - 0.75 M	273	147	775	920	210
IF50 - 0.25 M	210	210	755	920	210
IF50 - 0.50 M	210	210	755	920	210
IF50 - 0.75 M	210	210	755	920	210

3.4 วิธีการทดลอง

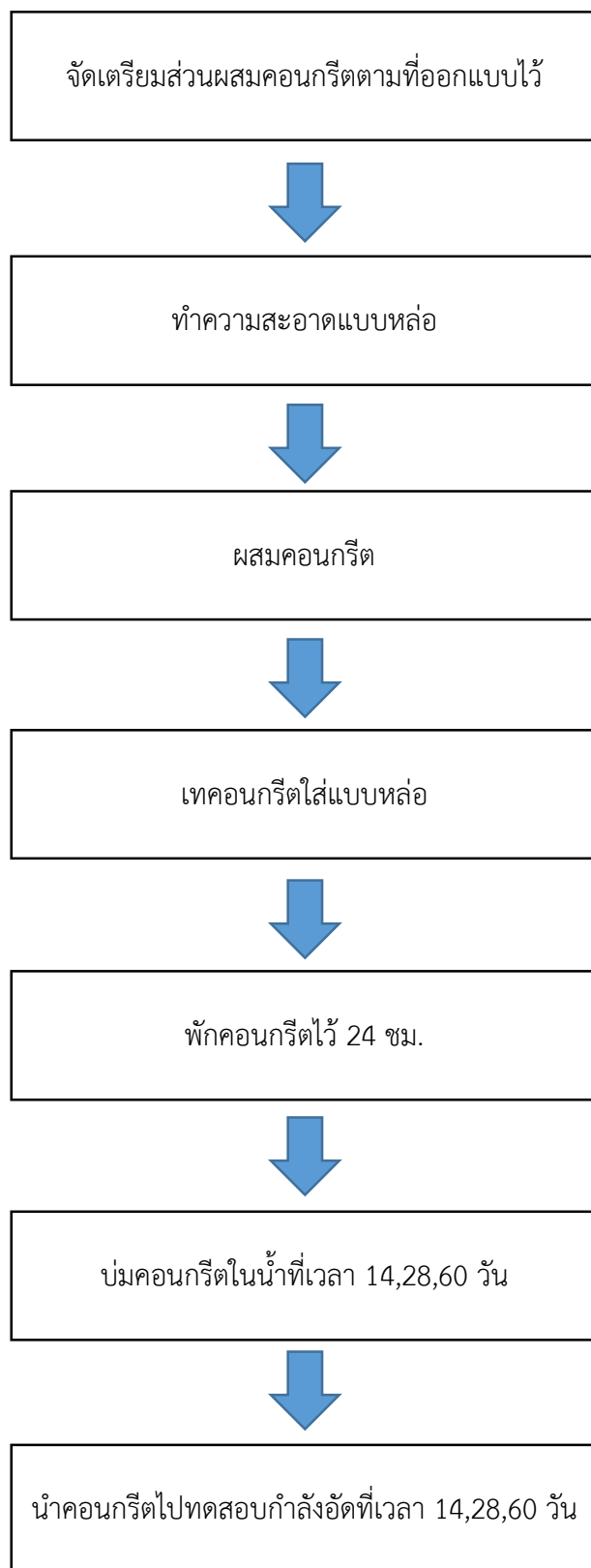
3.4.1 ขั้นตอนการทดลอง

วิธีการทดลองนี้เป็นขั้นตอนของการจัดทำก่อนคอนกรีตตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ ศึกษาผลของ แก้วถ่านหินที่มีผลต่อความสามารถรับแรงอัดของคอนกรีต

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการจัดเตรียมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แก้วถ่านหิน มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้มีปริมาณตามที่ออกแบบไว้ ทำความสะอาดแบบหล่อแล้วใช้น้ำมันหล่อลื่นทาแบบหล่อเพื่อป้องกันเนื้อคอนกรีตติดกับแบบหล่อ จากนั้นเริ่มผสมส่วนผสมโดยใส่แก้วถ่านหินลงในภาชนะที่จะทำการผสม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปผสมกับแก้วถ่านหิน และคนจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วพักไว้ จากนั้นจึงเริ่มผสมคอนกรีตโดยใส่ส่วนผสมตามลำดับ ลำดับการป้อนวัสดุเข้าเครื่องผสมคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องผสมและคุณสมบัติของคอนกรีต โดยทั่วไปจะใส่น้ำร้อยละ 10 ตามด้วยวัสดุอื่นอย่างสม่ำเสมอและทยอยใส่น้ำโดยเหลือน้ำร้อยละ 10 สำหรับใส่ในขั้นตอนสุดท้าย ในการใส่วัสดุอื่นมักนิยมใส่มวลรวมหยาบหรือหินลงก่อน และตามด้วยทรายและปูน การใส่วัสดุปอซโซลานจำพวก แก้วถ่านหินให้เติมพร้อมกับปูนซีเมนต์ สำหรับสารเคมีผสมเพิ่มจะผสมกับน้ำให้เข้ากันก่อนมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบลงในภาชนะผสมแล้วทำการผสมจนเข้ากัน โดยต้องทำที่ละส่วนผสม หลังจากผสมเสร็จสิ้นแล้วนำคอนกรีตที่ผสมแก้วถ่านหินที่ได้เทลงไปในแบบหล่อ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยแบ่งเทเป็น 3 ชั้นให้เทชั้นละ $\frac{1}{3}$ ของแบบหล่อ แล้วกระทุ้งคอนกรีตจำนวน 25 ครั้ง จนเต็มแบบหล่อ เมื่อทำเสร็จให้ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบและทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะแบบหล่อ แล้วบ่มคอนกรีตด้วยน้ำเป็นเวลา 14,28,60 วัน หลังจากครบอายุวัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปติดตั้งกับเครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐานแบบไฮดรอลิก และนำผลการทดลองไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบความสามารถรับกำลังอัด

- 1) เมื่อบ่มตัวอย่างคอนกรีต จนมีอายุครบตามกำหนดวัน จึงนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาพักไว้ในอากาศประมาณ 24 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบกำลังอัด
- 2) หลังจากที่พักก้อนคอนกรีตตัวอย่างไว้ถึงเวลาที่กำหนด นำก้อนคอนกรีตตัวอย่างติดตั้งที่เครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐานแบบไฮดรอลิก
- 3) กดจนก้อนคอนกรีตเกิดการวิบัติ จดบันทึกค่าความสามารถการรับแรงอัด



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.3 ผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.4 เทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ



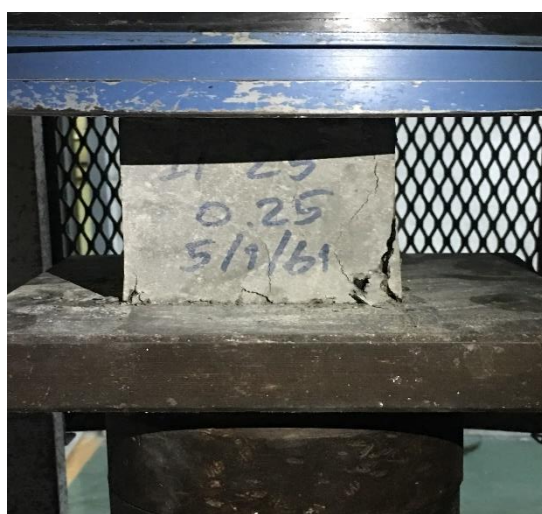
รูปที่ 3.5 คอนกรีตที่พักไว้ในแบบหล่อ 24 ชม.



รูปที่ 3.6 การบ่มคอนกรีตในน้ำ



รูปที่ 3.7 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3.8 ก้อนคอนกรีตหลังทดสอบกำลังอัด

3.4.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย
I	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสาน
F	ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการเผาระบบฟูดไคซ์เบด
25,50,75	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.25 , 0.50 และ 0.75 ตามลำดับ
15, 25, 35, 50	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต ที่ได้ทำการทดสอบในการเตรียมตัวอย่างเมื่อ 5 ปีที่แล้ว ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดสอบคอนกรีต หลังจากบ่มน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด ในด้านการรับกำลังอัด

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน[7]

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตโดยตรง เช่น ความสามารถในการเท ความต้องการน้ำ กำลังอัด และความทนทานของคอนกรีต เป็นต้น

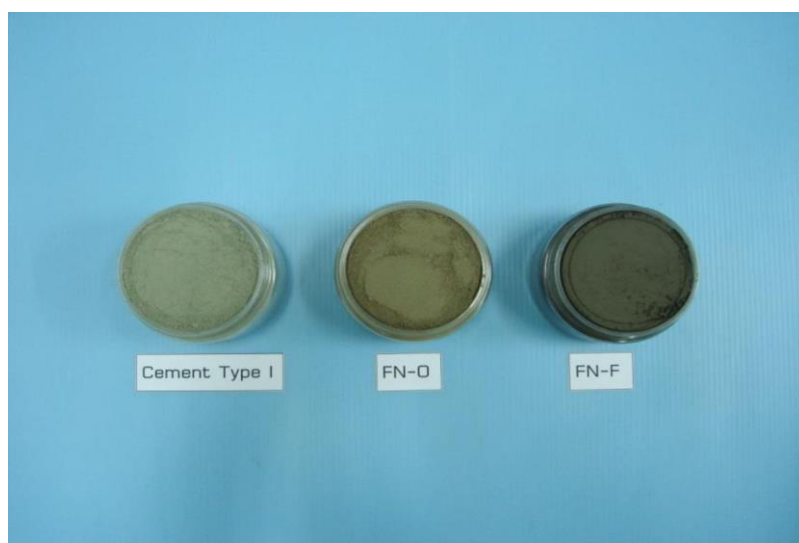
4.1.1.1 ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ

ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นผงละเอียดเมื่อสัมผัสดู รู้สึกว่าเถ้าถ่านหินมีเนื้อละเอียด ส่วนของปูนซีเมนต์ค่อนข้างหยาบกว่า จากรูปที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งมีสีเทาอ่อน ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของเหล็ก [Lea, 1970] ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส. โดยตรง (FN-O) มีสีเทาเข้มปนน้ำตาลอ่อน และเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบด ให้มีความละเอียดสูงขึ้น (FN-F) มีสีเทาดำ

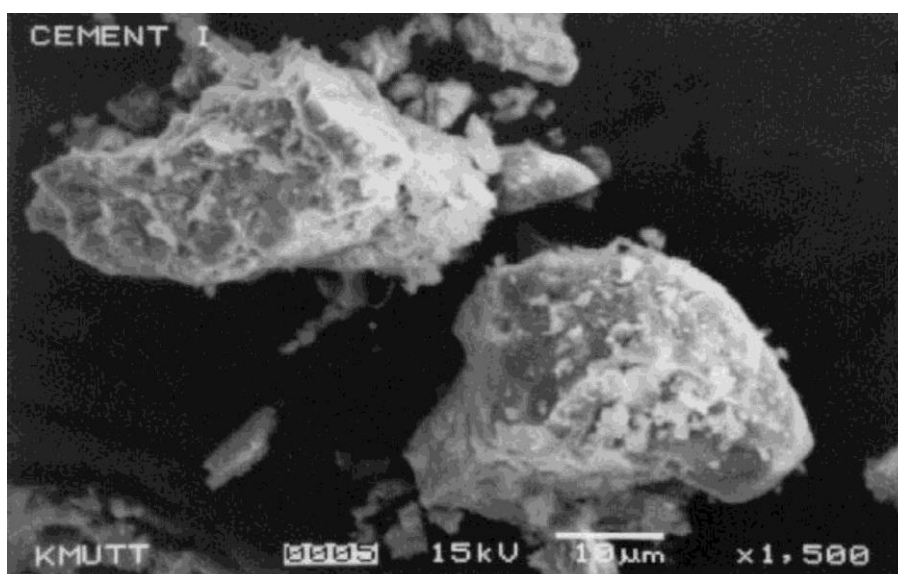
4.1.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และเถ้าถ่านหินซึ่งมีลักษณะเป็นฝุ่นผงขนาดเล็ก เมื่อนำมาตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องพบบว่า ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ รูปร่างไม่แน่นอน และอนุภาคจะมีหลายขนาดปะปนกัน (แสดงดังรูปที่ 4.2)

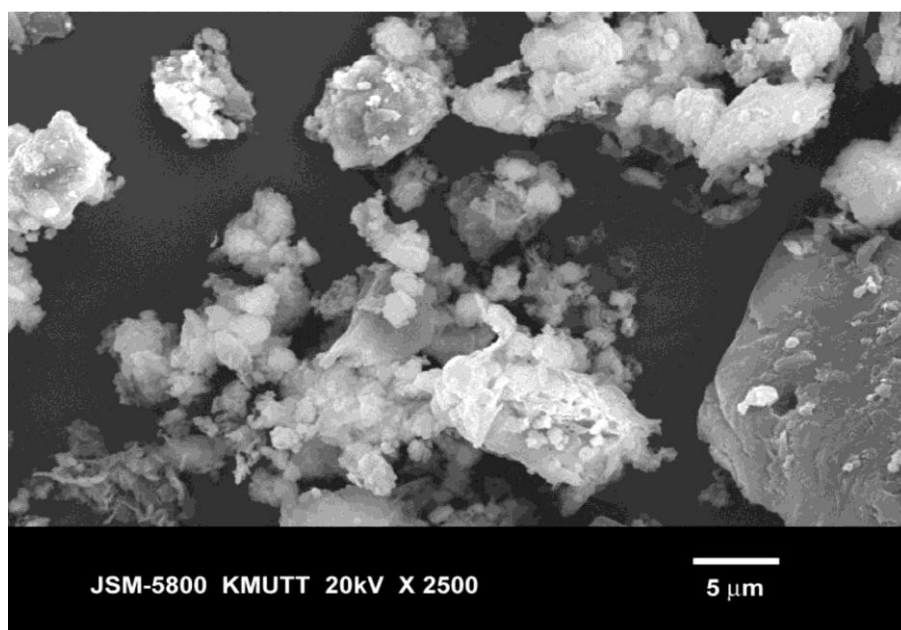
เถ้าถ่านหินเอ็น.พี.เอส.มีลักษณะอนุภาค มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม และมีความพรุนค่อนข้างสูง (แสดงดังรูปที่ 4.3) เนื่องจากในกระบวนการเผาถ่านหินใช้เตาเผาแบบFBC (Fluidized Bed Combustion) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้เผาค่อนข้างต่ำคือประมาณ 800-900 °C ทำให้ถ่านหินที่ได้ออกมามีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีความพรุนสูง [สุรพล พฤษานุญูล, 2546] เถ้าถ่านหินเอ็น.พี.เอส.ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกับก่อนทำการบดเพียงแต่มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงเท่านั้น(แสดงดังรูปที่ 4.4)



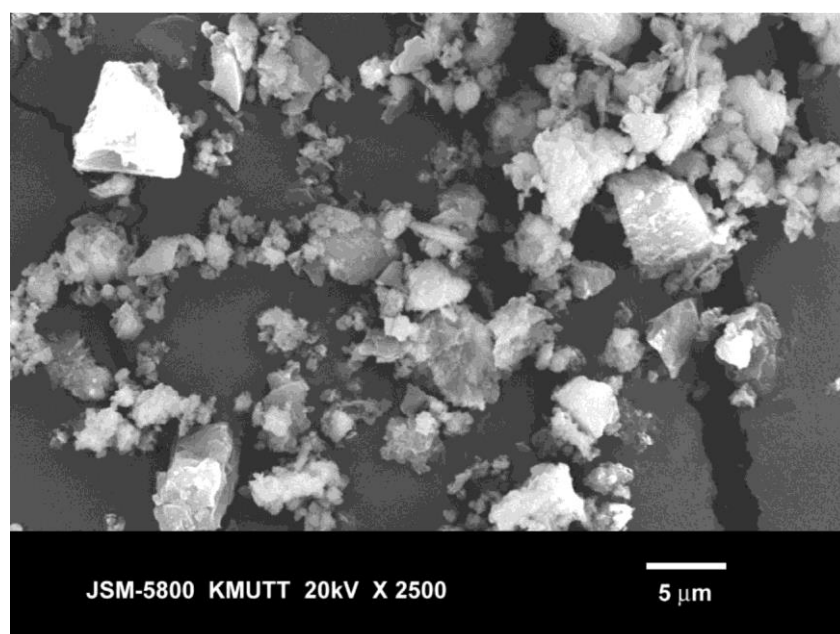
รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปและสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง เถ้าถ่านหินที่ได้ จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส. โดยตรง (FN-O) และเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.ที่ผ่านการ บดละเอียด (FN-F)



รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง



รูปที่ 4.3 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ได้จากโรงงานโดยตรง (FN-O)



รูปที่ 4.4 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ผ่านการบดละเอียด (FN-F)

4.1.1.3 ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่าเถ้านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส.โดยตรง (FN-O) มีค่าปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 40 ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้คือ ไม่เกินร้อยละ 34 ส่วนเถ้านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ผ่านการบดละเอียด (FN-F) มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ลดลงจากเถ้านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส.โดยตรง (FN-O) คือ มีค่าปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 2 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพของเถ้านหินด้วยวิธีการบดช่วยให้เถ้านหินมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น และสามารถลดขนาดอนุภาคให้เล็กลงได้

ความละเอียดของเถ้านหินเป็นปัจจัยบ่งชี้คุณสมบัติที่ดีอย่างหนึ่งเมื่อใช้เถ้านหินผสมคอนกรีต ความละเอียดของเถ้านหินมีความสำคัญ และส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก คือเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้านหินให้สูงขึ้นพบว่าคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีต ทั้งด้านกำลังอัด ความทนน้ำ และความสามารถในการเทของคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย [คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2547]

4.1.1.4 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในงานการศึกษา พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.13 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติของ ปูนซีเมนต์คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 [Lea, 1970] การปรับปรุงความละเอียดของเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. โดยการบดทำให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส. โดยตรง (FN-O) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.30 หลังจากทำการบดเถ้าถ่านหินเอ็น.พี.เอส.ให้ละเอียด (FN-F) มี ค่าความ ถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 2.35 ทั้งนี้เนื่องจากการบดทำให้อนุภาคของเถ้าถ่านหินที่มีความพรุนอยู่ในแตก ออก ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าความถ่วงจำเพาะแปรผันโดยตรงกับความละเอียด ซึ่งจากที่กล่าวไว้แล้วว่า เมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าถ่านหินให้สูงขึ้นพบว่า คุณสมบัติที่ดีของคอนกรีต ทั้งด้านกำลังอัด ความทึบน้ำ และความสามารถในการเทของ คอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีต ทั้งด้าน กำลังอัด ความทึบน้ำ และความสามารถในการเทของคอนกรีตก็เพิ่มขึ้นด้วย [คณะอนุกรรมการคอนกรีต และวัสดุ, 2547] อีกทั้ง ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับส่วนประกอบภายในเถ้าถ่านหินเอง เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแร่ เหล็กในปริมาณสูง จะมีความถ่วงจำเพาะสูงและมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก การเผา (LOI) ต่ำ ส่วน เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนสูง จะมีความถ่วงจำเพาะต่ำและมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงส่งผลให้คุณสมบัติของคอนกรีตทั้งด้านกำลังอัดและความทึบน้ำของคอนกรีตต่ำลง [คณะอนุกรรมการ คอนกรีตและวัสดุ, 2547]

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No.325 (%)
Cement Type I	3.13	N/A
FN-O	2.30	40
FN-F	2.35	2

Remark: N/A = Not applied

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Wet Chemical Analysis พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเท่ากับร้อยละ 94.43 มาตรฐาน ASTM C 150 กำหนดว่าปริมาณ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 4.0 ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

Chemical Composition	Cement I	FN-0	FN-F
Silicon Dioxide, SiO ₂ (%)	20.80	46.08	46.70
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ (%)	5.50	12.50	12.85
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃ (%)	3.16	2.04	5.91
Calcium Oxide, CaO (%)	64.97	3.75	4.17
Magnesium Oxide, MgO (%)	1.06	N/A	N/A
Sodium Oxide, Na ₂ O (%)	0.08	0.08	0.14
Potassium Oxide, K ₂ O (%)	0.55	0.88	1.07
Sulfur Trioxide, SO ₃ (%)	2.96	0.82	0.77
Loss on Ignition, LOI (%)	2.89	26.63	25.06
Tricalcium Silicate, C ₃ S (%)	56.50	-	-
Dicalcium Silicate, C ₂ S (%)	17.01	-	-
Tricalcium Aluminate, C ₃ A (%)	9.23	-	-
Tetracalcium Aluminoferrite, C ₄ AF (%)	9.62	-	-

Remark: N/A = Not applied

FN-0 = เถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ไม่ผ่านการบด

FN-F = เถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ผ่านการบดละเอียด

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. FN-O และ FN-F ตามตารางที่ 4.2 พบว่า ผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มีค่าเท่ากับร้อยละ 60.62 และ 65.46 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 5 แต่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีค่าสูงกว่าร้อยละ 6 ค่อนข้างมาก (มี LOI ประมาณร้อยละ 25) จึงไม่อาจจัดเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. อยู่ใน Class C ได้ตามหลักการของการ จำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี แต่เพื่อความชัดเจนในการนำเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส.ไปใช้ในงานคอนกรีต จำเป็นต้องศึกษาถึงผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และการซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินดังกล่าวด้วย

เมื่อพิจารณาโดยภาพรวม พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน FN-O มีค่าใกล้เคียงกับเถ้าถ่านหิน FN-F ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mora และคณะ (1993) และ สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ (2538) ที่พบว่า การคัดแยกขนาดเถ้าถ่านหินไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

4.2 คุณสมบัติของมวลรวม[7]

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.

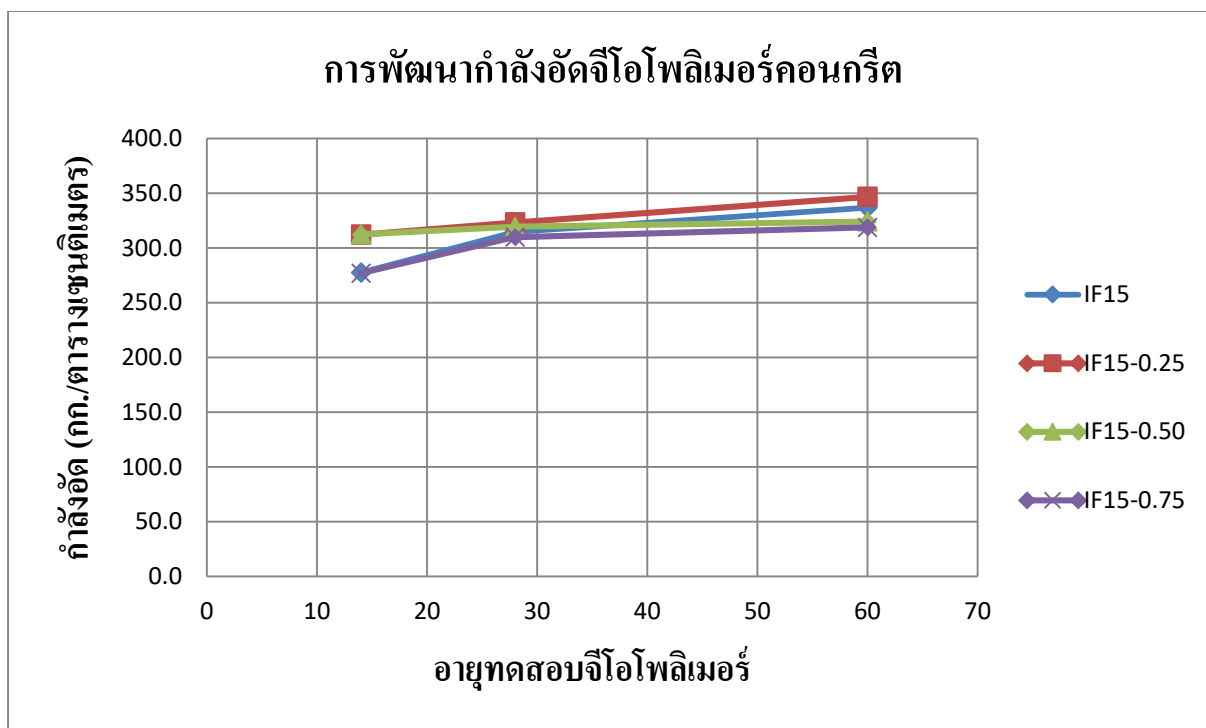
Determination	Coarse Aggregate	Fine Aggregate
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72	2.61
Apparent Specific Gravity	2.74	2.65
Absorption (%)	0.43	0.90
Fineness Modulus	N/A	2.95
Maximum Size (mm)	20	N/A

Remark: N/A = Not applied

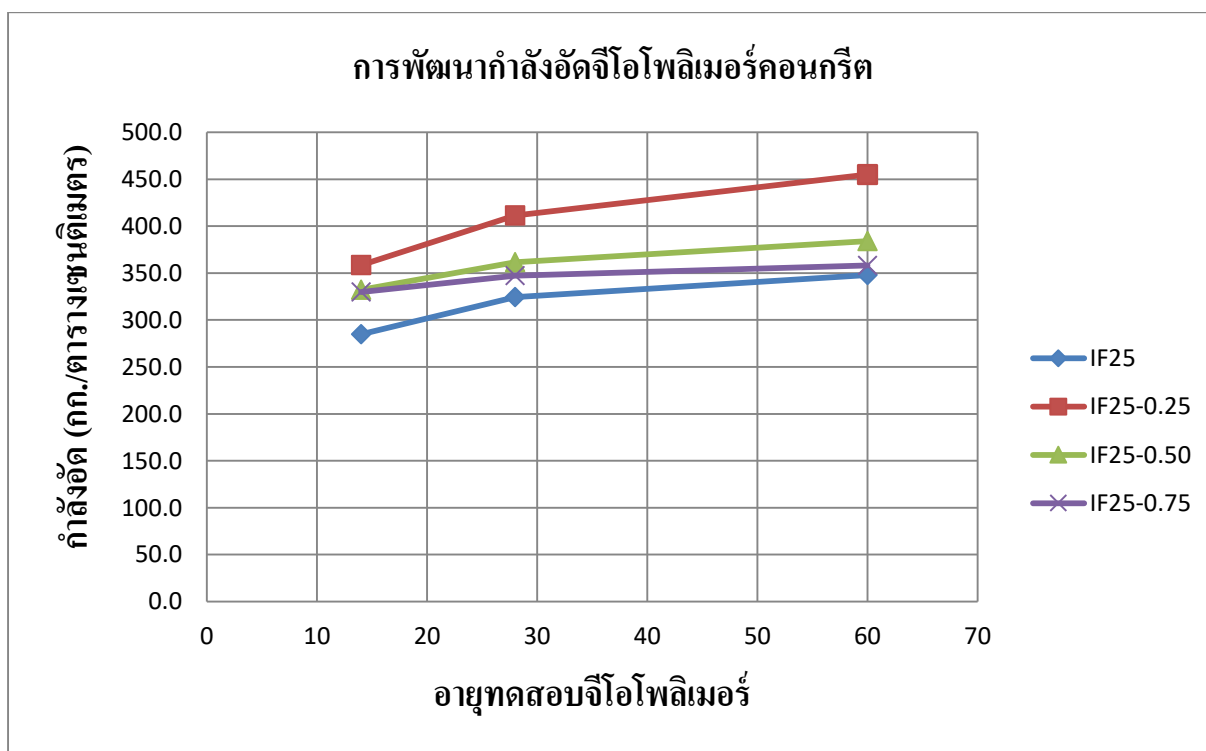
4.3 การพัฒนากำลั้งของคอนกรีต

การพัฒนากำลั้งอัดของคอนกรีต ตามระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตแสดงดังรูปที่4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลั้งอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน ร้อยละ 15 25 35 และ50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานกับระยะเวลาบ่ม ตามลำดับพบว่า โดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มกำลั้งอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น และมีการพัฒนากำลั้งอัดในช่วง 14 ถึง 28 วันแรกสูงกว่า ช่วง 28 ถึง 60วัน (สังเกตจากความชันของกราฟ ในช่วง28วันแรกจะชันมากกว่า 28 ถึง 60วัน) ในช่วงอายุต้นของการบ่มกำลั้งอัดของคอนกรีตจะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก หลังจากนั้นคอนกรีตเริ่มปฏิกิริยาปอซโซลานมีผลให้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มมีผลต่อกำลั้งอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตเกิดขึ้นช้าและต้องใช้เวลาานาน แสดงถึงผลของวัสดุปอซโซลานต่อการพัฒนากำลั้งอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มต่างๆ โดยพบว่าการบ่มคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีกำลั้งอัดสูงขึ้นตามระยะเวลาที่นานขึ้น

การศึกษาครั้งนี้พบว่า การพัฒนากำลั้งอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน มีกำลั้งอัดต้นสูงอยู่แล้ว จึงมีผลให้การพัฒนากำลั้งอัดมีแนวโน้มลดลง

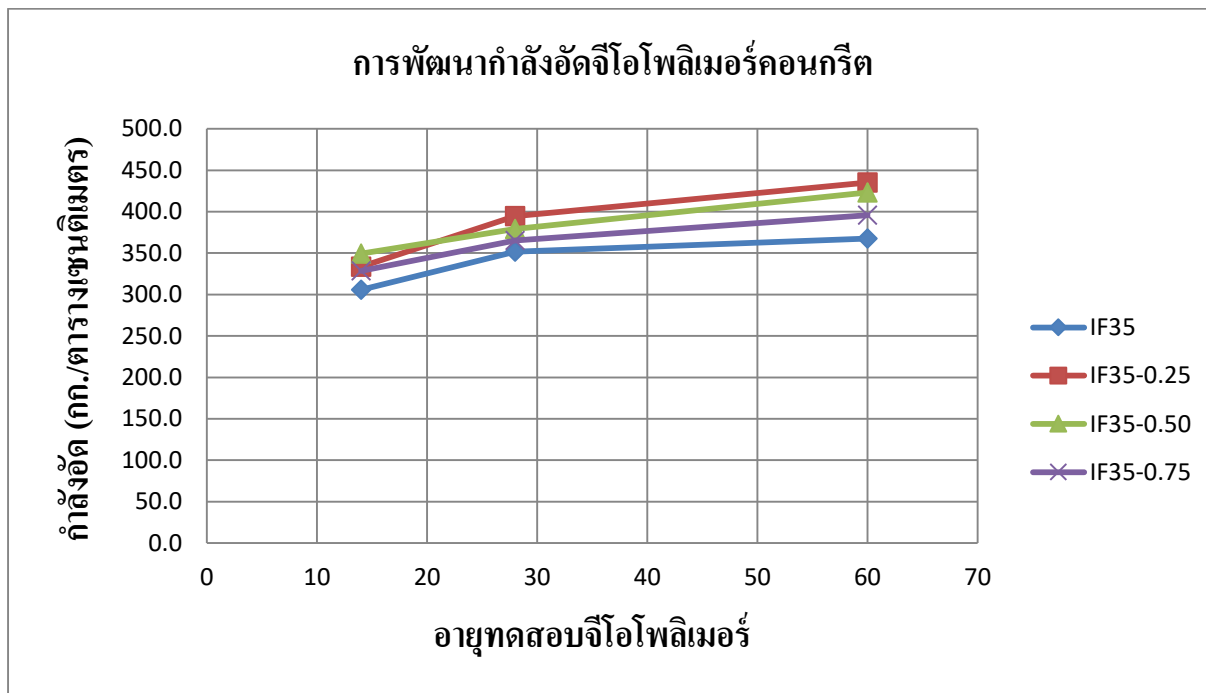


(ก.)

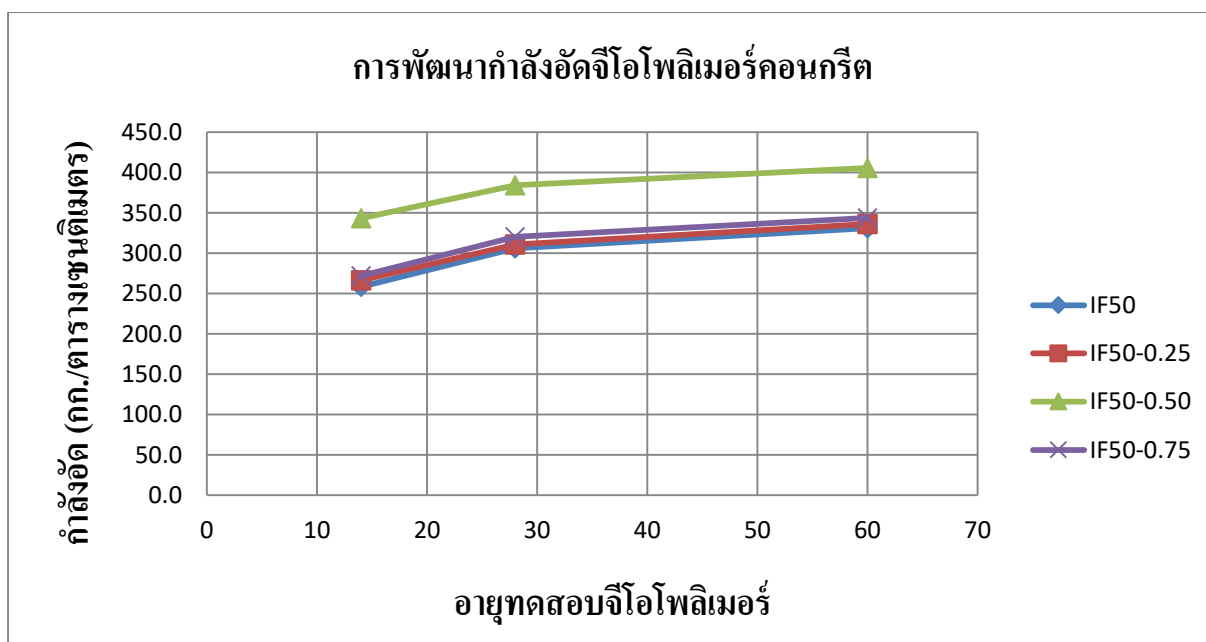


(ข.)

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุบ่ม



(ค.)

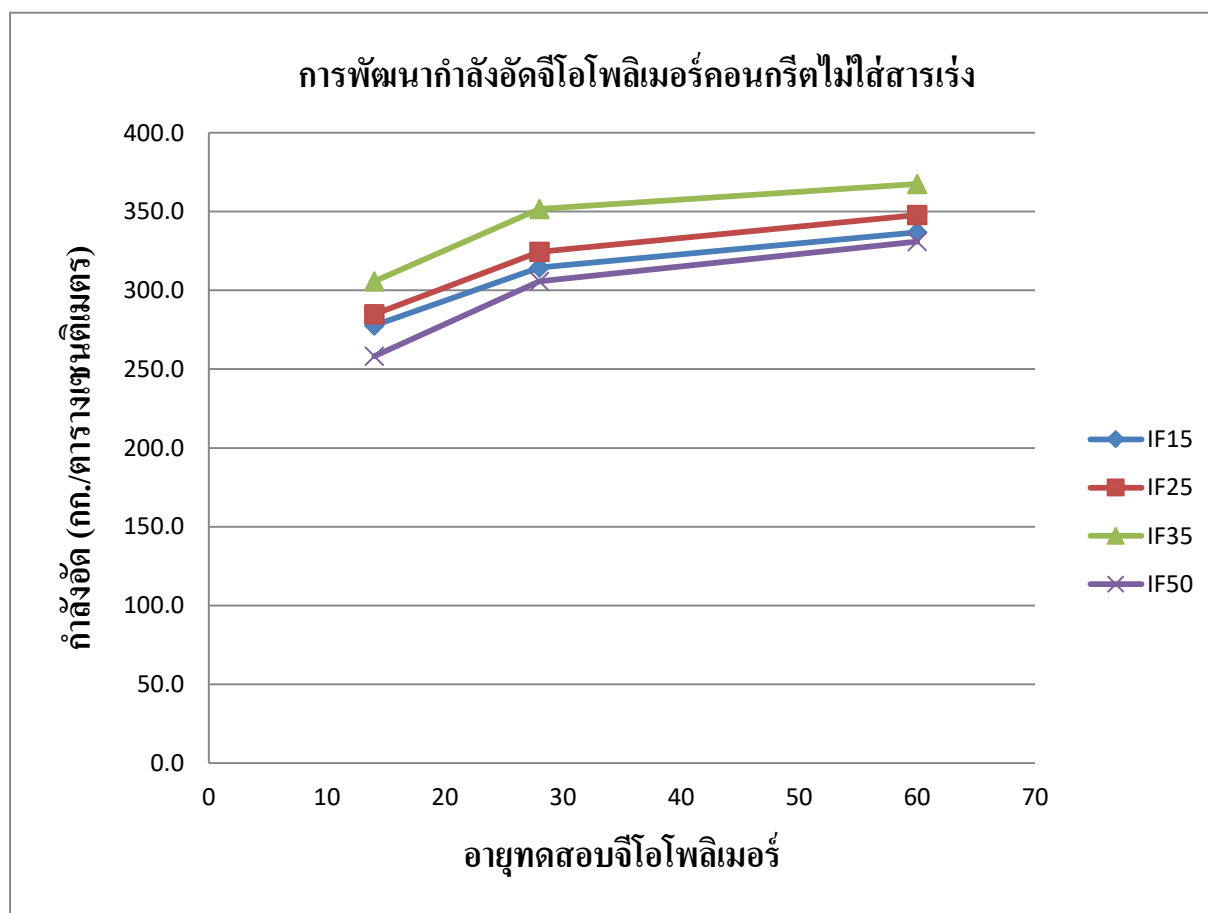


(ง.)

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุบ่ม

4.4 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการรับกำลังอัด

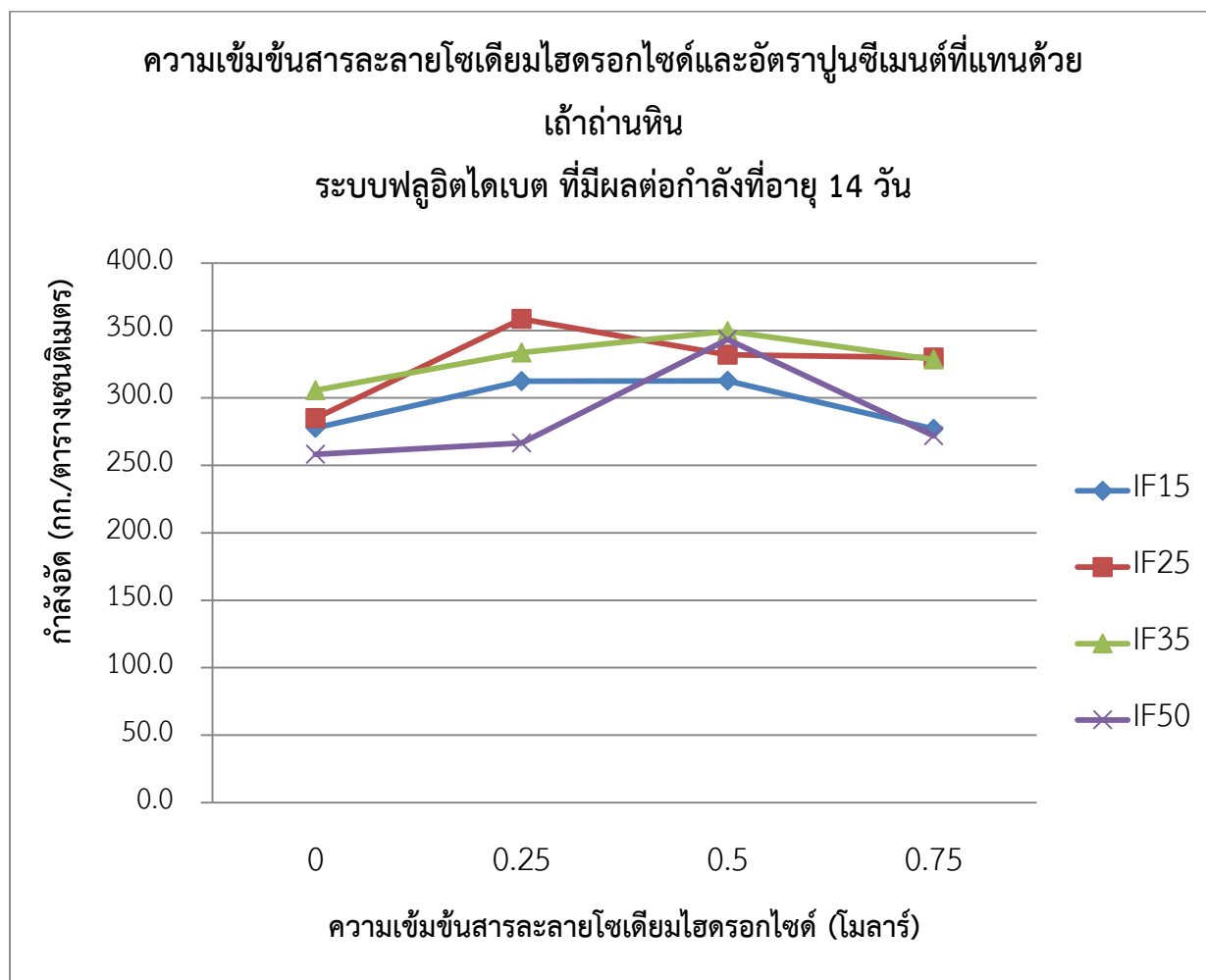
จากรูป 4.6 เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 35 พบว่ามีแนวโน้มคุณสมบัติในการรับกำลังอัดได้ดีที่สุด การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 มีคุณสมบัติรับแรงอัดรองลงมา และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 และ 50 มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอิทธิพลของวัสดุปอซโซลาน ที่ผสมลงในคอนกรีตในอัตราส่วนที่เหมาะสมส่งผลให้ลดจำนวนรูพรุนและช่องว่างของคอนกรีต เพิ่มความหนาแน่น เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตสูงกว่าปกติ แต่การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตที่ปริมาณมากเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงอัตราส่วนการทดแทน เถ้าถ่านหินนิยมใช้ในงานคอนกรีตหลาหรือคอนกรีตขนาดใหญ่ มักใช้อัตราส่วนการแทนที่โดยทั่วไปสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มคอนกรีต

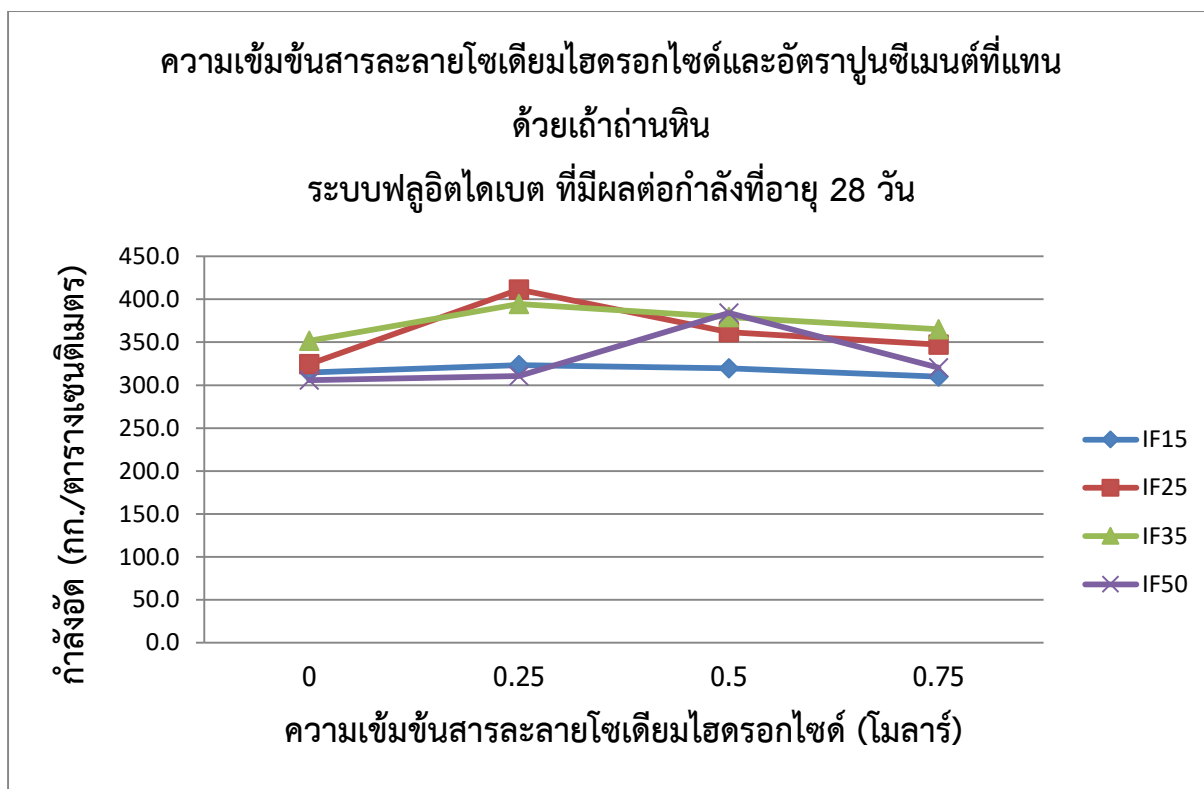
4.5 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการรับกำลังอัด

จากรูป 4.7 กำลังอัดของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 ของน้ำหนักวัสดุประสานที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ มีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดีที่สุดในทุกช่วงอายุและทุกความเข้มข้นของคอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่างเร่งปฏิกิริยา และมีการลดลงของกำลังเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งการลดลงของกำลังอัดคอนกรีตเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูง อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการชะเอาซิลิกาจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเจอความชื้นจะทำให้ลื่นมากขึ้นและส่งผลให้แรงยึดเกาะในเนื้อคอนกรีตลดต่ำลง ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

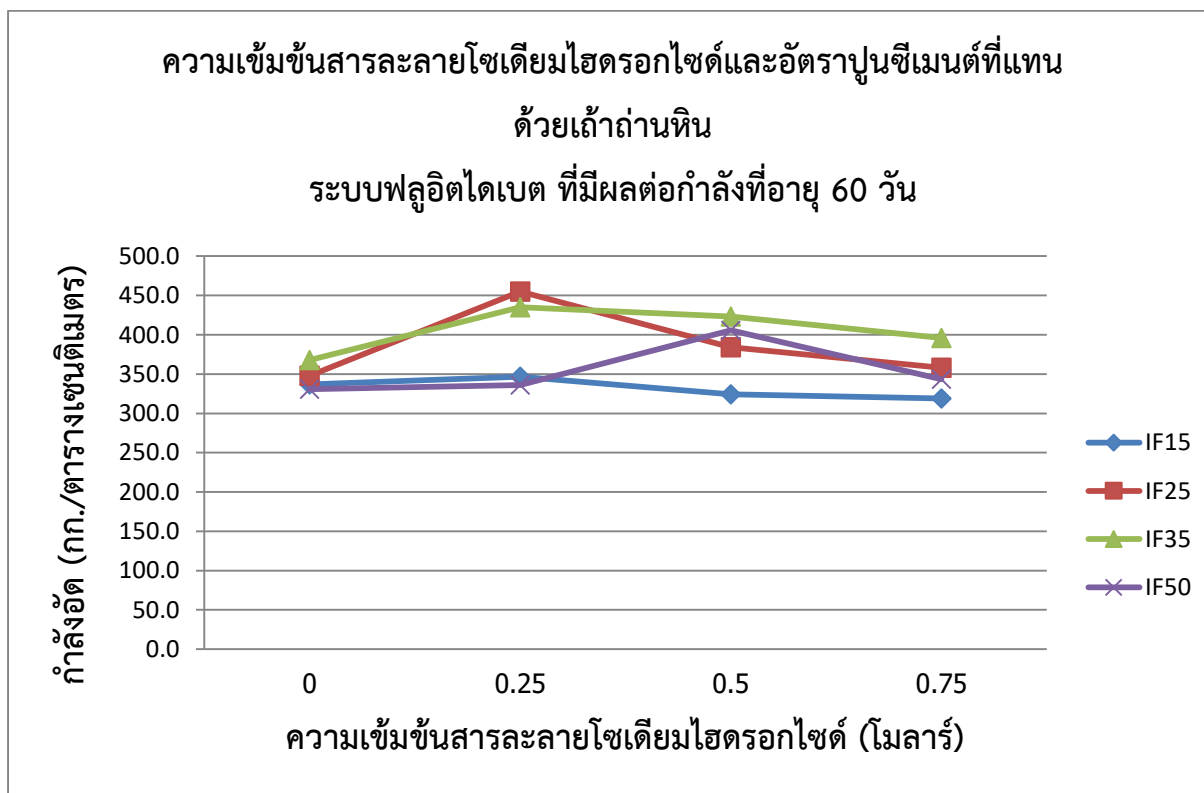


(ก.)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

บทที่5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1.1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่เกิน 0.25 โมลาร์ เหมาะสำหรับอัตราส่วนการแทนที่ของเถาถ่านหินที่ร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.25 โมลาร์ ในกลุ่มคอนกรีตดังกล่าวจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง แต่ในอัตราการแทนที่ของเถาถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานควรใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.50 โมลาร์ เพราะเป็นความเข้มข้นที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด

5.1.2 ที่อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในอัตราการแทนที่ของเถาถ่านหินร้อยละ 50 ของวัสดุประสาน สามารถทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ใกล้เคียงกับกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ และไม่ใส่สารเร่งปฏิกิริยา

5.1.3 การใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีความเหมาะสมเป็นอัตราส่วนผสมของคอนกรีตปอซโซลาน

5.1.4 การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ในกลุ่มของคอนกรีตที่แทนที่โดยเถาถ่านหินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในด้านของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานโดยไม่ใส่สารเร่งปฏิกิริยาเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเนื่องจากให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เถาถ่านหินมาจากที่เดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์และชัดเจนยิ่งขึ้นควรจะศึกษาและเปรียบเทียบกับเถาถ่านหินต่างที่มาเพื่อให้การทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

5.2.2 การศึกษาครั้งนี้เป็นการใช้เพียงเถาถ่านหินเพียงอย่างเดียวในการทดสอบการรับกำลังอัดเพื่อให้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นเพิ่มเติม

บรรณานุกรม

กำลังอัดของคอนกรีต,(ม.ป.ป.), [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : <http://tunjai.com>

ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตก่อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปทรงลูกบาศก์,(ม.ป.ป.),
[ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : <http://yotathai.com>

เถ่าถ่านหิน,(ม.ป.ป.), [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : <https://tauruspozzolan.com/product-flyash.php>

เถ่าถ่านหิน,(ม.ป.ป.), [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : <http://raungrut.tunjai.com>

มณสรรา เอี่ยมวิจิตร, (2557). สมบัติของเถ้าลอยขับพิษมีนัสจากกระบวนการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ,(ม.ป.ป.), [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : <http://tunjai.com>

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, (2550). สมบัติของเถ่าถ่านหินการเผาแบบระบบฟลูอิดไดซ์เบด

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จำตุรพิทักษ์กุล, (2556).

ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.)

รัชชานนท์ รุ่งเรืองวัฒนโชติ และรัชนิกร สนสุนันท์, (2559).ผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการ

แทรกซึมของคลอไรด์ใน คอนกรีตที่ผสมเถ่าถ่านหิน โดยวิธี Bulk diffusion test

อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, (2544). การใช้เถ้าลอยในคอนกรีต

ภาคผนวก ก

ตารางภาคผนวก ก ที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Mix	Mix proportions (kg/m ³)				
	CCR	Fly ash	Fine Agg.	Coarse Agg.	Liquid
IF15	357	63	810	920	210
IF25	315	105	795	920	210
IF35	273	147	775	920	210
IF50	210	210	755	920	210
IF15 - 0.25 M	357	63	810	920	210
IF15 - 0.50 M	357	63	810	920	210
IF15 - 0.75 M	357	63	810	920	210
IF25 - 0.25 M	315	105	795	920	210
IF25 - 0.50 M	315	105	795	920	210
IF25 - 0.75 M	315	105	795	920	210
IF35 - 0.25 M	273	147	775	920	210
IF35 - 0.50 M	273	147	775	920	210
IF35 - 0.75 M	273	147	775	920	210
IF50 - 0.25 M	210	210	755	920	210
IF50 - 0.50 M	210	210	755	920	210
IF50 - 0.75 M	210	210	755	920	210

อัตราส่วน เถ้าถ่าน หิน	NaOH (Molar)	อายุทดสอบ					
		14		28		60	
IF15	-	276.5	277.7	317.2	314.6	343.1	336.9
		282.2		309.4		338.3	
		274.4		317.1		329.3	
	0.25	306.5	312.3	331.4	323.4	346.8	346.8
		316.6		343.1		353.6	
		313.9		295.7		340.0	
	0.5	311.2	312.6	316.6	319.5	318.2	324.3
		324.5		315.1		326.7	
		302.1		326.7		327.9	
	0.75	292.5	277.1	335.8	309.9	320.2	318.8
		267.0		292.4		316.4	
		272.0		301.6		319.9	
IF25	-	277.5	284.9	323.8	324.5	342.9	347.8
		286.4		316.1		358.6	
		290.9		333.6		341.8	
	0.25	354.2	358.5	411.5	411.3	463.8	454.9
		363.8		420.2		446.0	
		357.5		402.3		454.8	
	0.5	336.2	332.1	376.2	361.7	376.9	384.1
		330.4		377.4		383.4	
		329.7		331.4		392.2	
	0.75	328.4	330.0	342.8	347.3	356.3	358.2
		333.4		352.2		355.7	
		328.0		346.8		362.8	

ตารางภาคผนวก ก ที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีต IF15 และ IF25

ตารางภาคผนวก ก ที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีต IF35 และ IF50

อัตราส่วน เถ้าถ่าน หิน	NaOH (Molar)	อายุทดสอบ					
		14		28		60	
IF35	-	300.4	305.7	381.8	351.7	376.0	367.6
		301.2		334.8		376.2	
		315.6		338.7		350.6	
	0.25	346.1	333.5	388.7	394.6	431.4	435.1
		327.4		401.8		447.0	
		327.0		393.3		427.0	
	0.5	336.7	349.5	384.7	379.1	429.0	423.0
		350.5		378.2		415.6	
		361.5		374.5		424.6	
	0.75	332.4	328.6	371.8	365.3	394.4	395.8
		330.6		362.7		402.8	
		322.7		361.4		390.2	
IF50	-	251.5	258.2	309.6	305.9	333.5	330.9
		254.9		302.3		333.1	
		268.3		305.7		326.0	
	0.25	275.5	266.5	298.0	310.7	327.4	336.0
		270.0		320.8		334.1	
		253.9		313.3		346.4	
	0.5	361.0	343.4	387.2	384.2	423.8	405.6
		338.6		370.4		389.7	
		330.7		394.9		403.5	
	0.75	256.0	271.9	314.2	320.2	341.3	343.5
		272.4		321.8		335.9	
		287.4		324.7		353.4	

ตารางภาคผนวก ก ที่ 4 อายุคอนกรีต

คอนกรีต	วันที่ผสม	อายุ14 วัน	อายุ28 วัน	อายุ60 วัน
IF15	18-ม.ค.	31-ม.ค.	14-ก.พ.	18-มี.ค.
IF25	19-ม.ค.	1-ก.พ.	15-ก.พ.	17-มี.ค.
IF35	21-ม.ค.	3-ก.พ.	17-ก.พ.	19-มี.ค.
IF50	22-ม.ค.	4-ก.พ.	18-ก.พ.	20-มี.ค.
IF15-0.25	26-ม.ค.	8-ก.พ.	22-ก.พ.	24-มี.ค.
IF15-0.50	31-ม.ค.	13-ก.พ.	27-ก.พ.	27-มี.ค.
IF15-0.75	31-ม.ค.	13-ก.พ.	27-ก.พ.	27-มี.ค.
IF25-0.25	5-ก.พ.	18-ก.พ.	4-มี.ค.	5-เม.ย.
IF25-0.50	6-ก.พ.	19-ก.พ.	5-มี.ค.	6-เม.ย.
IF25-0.75	6-ก.พ.	19-ก.พ.	5-มี.ค.	6-เม.ย.
IF35-0.25	9-ก.พ.	22-ก.พ.	8-มี.ค.	9-เม.ย.
IF35-0.50	12-ก.พ.	25-ก.พ.	11-มี.ค.	12-เม.ย.
IF35-0.75	10-ก.พ.	23-ก.พ.	9-มี.ค.	10-เม.ย.
IF50-0.25	11-ก.พ.	24-ก.พ.	10-มี.ค.	11-เม.ย.
IF50-0.50	12-ก.พ.	25-ก.พ.	11-มี.ค.	12-เม.ย.
IF50-0.75	12-ก.พ.	25-ก.พ.	11-มี.ค.	12-เม.ย.

ภาคผนวก ข

ผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อกำลั่งอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาระบบฟลูอิดไดซ์เบด

พุมภพ เพ็ชรี่ พงศกร สังข์น้อย วิเชียร ชาลี เทียง ชีวะเกตุ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลั่งอัดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ส่วนผสมในคอนกรีตทดสอบมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหิน ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เป็นต่างแรงปฏิกิริยา หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 100 มม. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 14, 28 และ 60 วัน จากนั้นทำการทดสอบกำลั่งอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลั่งอัดคอนกรีตระบบไฮดรอลิกส์

ผลการศึกษาพบว่ากำลั่งอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.25 โมลาร์ การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลั่งอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH มากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานคอนกรีต เนื่องจากให้กำลั่งอัดสูงที่สุด

โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 27 ที่อายุ 28 วัน

คำสำคัญ: กำลั่งอัด / คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน / สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ / ต่างแรงปฏิกิริยา

EFFECT OF ALKALINE ACTIVATOR ON PROPERTIES OF CONCRETE FORM USING A CEMENTITIOUS MATERIAL WHICH CONTAINING WITH FLUIDIZED BED COMBUSTION FLY ASH

Poombob Phetchary, Pongsakorn Sungnoi, Wichian Chalee, and Tieng Cheewaket

Abstract

This study investigated the effect of NaOH solution concentration on alkaline catalyst on compressive strength of fly ash concrete by replacing fly ash in Portland cement type 1, 15, 25, 35 at the percentage of 50 by weight of cementitious materials. NaOH Solution of 0.00, 0.25, 0.50 and 0.75 were used as catalysts. Concrete sample size $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ was applied. After that, the concrete was cured in water. Compressive strength test were determined for 14, 28 and 60 days.

The results showed that the compressive strength of concrete mixed with fly ash was higher not more than 0.5 molar by using NaOH solution with concentration, the use of fly ash mixed with concrete increased. Effect of NaOH solution on NaOH solution was higher than that of NaOH solution. This study found that The 0.25 molar NaOH solution was used in the 25% coagulated coal ash by weight of binder. The cementitious material was suitable for water application because of the highest compressive

strength. The value of control concrete increased to 27% at 28 days.

Keywords: Compressive Strength / Fly Ash Concrete / Sodium Hydroxide Solution / Alkaline Activator

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อน และ กระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจในปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต โดยทำการปรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งอัตราของส่วนผสมมีผลต่อคุณสมบัติและราคาของคอนกรีต เหตุนี้ผู้ทำการวิจัยจึงต้องการหาอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ช่วยลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ แต่คุณสมบัติของคอนกรีตยังคงให้ผลลัพธ์ในทางที่ดีหรือใกล้เคียงกันกับส่วนผสมเดิม โดยใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาขยะฟลูอิดไดซ์เบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง

เถ้าถ่านหิน (fly ash) เถ้าถ่านหินได้จากการนำถ่านหินมาใช้ในโรงงานไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้ถ่านหินและได้เถ้าถ่านหินเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตก่อให้เกิดปัญหาเรื่องมลภาวะทางอากาศ ปัจจุบันเถ้าถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้าแม้จะมีคุณภาพสูงและเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งานมากที่สุดของประเทศไทย แต่ยังมีเถ้าลอยจากแหล่งอื่นๆ ในงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยได้ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า เอน. พี. เอส. ปราจีนบุรี ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าบิโหมินัสผสมชีวมวลเป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาระบบ ฟลูอิดไดซ์เบด ระบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นการเผาแบบใช้

ความร้อนต่ำ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านหินอยู่ที่ไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ทำให้เถ้าลอยมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงพอ ใช้เป็นวัสดุปอกโซลานได้แต่อาจไม่ดีเท่าการเผาความร้อนปานกลาง แต่การเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดเริ่มมีใช้มากขึ้นสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานขนาดเล็ก เพราะเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดเนื่องจากมีการพ่นปูนขาวเข้าไปดักจับก๊าซกำมะถันหรือซัลเฟอร์ออกไซด์ ทำให้ลดปริมาณกำมะถันที่ปล่อยออกมาได้ถึงร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังลดปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากถ่านหินได้ด้วย ส่งผลให้เถ้าถ่านหินมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตสูง

ปูนซีเมนต์มีหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ ให้กำลังแก่คอนกรีตแข็งตัว รวมถึงป้องกันการซึมผ่านของน้ำ คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตที่มีราคาสูง การผลิตซีเมนต์ที่นิยมใช้กันเป็นการผลิตแบบแห้ง ไม่ต้องใช้น้ำในการผสมวัตถุดิบ ดังนั้นจึงประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยเฉพาะค่าเชื้อเพลิง วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตคือ หินปูน (Limestone) ที่ได้จากการระเบิดหิน

จากภูเขาหินปูน ซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและ
เกิดการสูญเสียทรัพยากรทางธรรมชาติ

ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับส่วนผสมของ
คอนกรีตที่ทดแทนอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ หากมี
ส่วนผสมที่เหมาะสมก็จะส่งผลให้คอนกรีตสามารถ
รับแรงได้เหมาะสมกับการใช้งานและเป็นการลด
ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผสมคอนกรีตรวมไปถึง
ผลกระทบในด้านอื่นๆ จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า
เถ้าถ่านหินมีคุณสมบัติปรับปรุงความสามารถใน
การเทคอนกรีตเพราะว่าเถ้าถ่านหินมีอนุภาคที่
กลมช่วยในการหล่อลื่นระหว่างอนุภาคของมวล
รวมถึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัวได้สูง ในส่วนของ
กำลังรับแรงอัดนั้น พบว่าทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน
ลดต่ำลงและเมื่อผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดร
ออกไซด์กับปูนซีเมนต์ สารละลายโซเดียมไฮดรอก
ไซด์จะแยกซิลิกาและ อลูมินา ออกจากเถ้าถ่าน
หินและจะช่วยกระตุ้นการทำปฏิกิริยาระหว่าง
ปูนซีเมนต์กับเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้คอนกรีตมี
คุณสมบัติที่ดีขึ้น

จากข้อความดังกล่าวผู้วิจัยได้ตระหนัก
และทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการทดลองผล
ของการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อ
ทดสอบหาคุณสมบัติคอนกรีต อีกทั้งยังเป็นรักษา
สิ่งแวดล้อมรวมถึงการกำจัดปัญหาเถ้าถ่านหินที่
หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นผล
ของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้ปรับเปลี่ยน
อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับเถ้าถ่านหิน

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยน
อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่
ร้อยละ 15, 25, 35 และร้อยละ 50 ของวัสดุประสาน
ที่มีผลต่อการรับกำลังอัดของคอนกรีต

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความ
เข้มข้นในช่วง 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ ที่
ใช้เป็นต่างเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการรับกำลังอัด
ของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้เป็นต่างเร่ง
ปฏิกิริยาต่อความสามารถรับกำลังอัด โดยแทนที่
เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ร้อยละ 15, 25, 35 และร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก
วัสดุประสานและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอก
ไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0, 0.25, 0.50 และ
0.75 โมลาร์ เป็นต่างเร่งปฏิกิริยาหล่อตัวอย่าง
คอนกรีตเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
100 มม. สูง 100 มม. และบ่มตัวอย่างคอนกรีต
เป็นเวลา 14, 28 และ 60 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 การนำวัสดุปอซโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตจะช่วยประหยัดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ ทำให้ลดต้นทุนในการก่อสร้างและลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการผลิต

1.4.2. การนำวัสดุปอซโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้คุณภาพของคอนกรีตดีขึ้น ทั้งด้านกำลังและความทนทานโดยเฉพาะการรับแรงอัด

1.4.3. ใช้เป็นข้อมูลในการประเมินคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในระยะยาว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการรับแรงอัดระยะยาว

2.วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกา และ อลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ว วัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำให้ด้านประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกปฏิกิริยา

ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction)

วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และ ดินขาว (Mata kaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้ากลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

2.1.1 หลักการทำงานของวัสดุปอซโซลาน วัสดุปอซโซลานเมื่อนำมาผสมปูนซีเมนต์นั้นจะพบได้ว่าปริมาณซิลิกาที่มีอยู่ในปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolan Reaction) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และอนุภาคที่เล็กของปอซโซลานสามารถแทรกตัว (Filler) เข้าไปในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ ในคอนกรีตนอกจากนี้อนุภาคที่กลมเป็นส่วนใหญ่ส่งผลให้ซีเมนต์ที่ผสมด้วยปอซโซลานมีกำลังเพิ่มขึ้นและเพิ่มความสามารถในการเทคอนกรีตขึ้น

2.1.2 อิทธิพลของวัสดุปอซโซลาน

อิทธิพลของวัสดุปอซโซลานส่งผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ส่งผลดังต่อไปนี้

1) ความร้อนจากการไฮเดรต (Heat of Hydration) ปฏิกิริยาไฮเดชันนั้นเป็นปฏิกิริยาให้

ความร้อนสูงในคอนกรีตผสมจำพวก แก้วถ่านหิน หรือผงเถ้าตะกั่วถลุงเหล็ก ส่งผลให้ซีเมนต์ที่ผสม แก้วถ่านหินเกิดปฏิกิริยาลดลงซึ่งเมื่อรวมกับปฏิกิริยา ปอซโซลานิกที่ค่อนข้างช้า ส่งผลให้ซีเมนต์ที่ผสม แก้วถ่านหินมีการเกิดไฮเดรชันที่ต่ำในช่วงแรกและมี ผลิตความร้อนออกมาในปริมาณที่ต่ำกว่าซีเมนต์ ปกติ

2) ความสามารถในการทำงาน

(Workability) ในกรณีของแก้วถ่านหิน แก้วถ่านหิน มีอนุภาคที่กลมและมีขนาดเล็กกว่าซีเมนต์ อนุภาค ที่เล็กและกลมทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวหล่อลื่นเข้าไปแทรกตามช่องว่างหรือรูพรุนภายในคอนกรีตทำให้คอนกรีตที่ผสมปอซโซลานมีความสามารถในการเพิ่มขึ้น และมีความแน่นมากกว่าปกติ

3) พัฒนาการของกำลัง (Strength Development) การผสมวัสดุปอซโซลานลงในคอนกรีตนอกจากจะส่งผลให้ลดจำนวนรูพรุนและช่องว่างของคอนกรีต การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น ปริมาณแคลเซียม ซิลิเกตไฮดรอกไซด์ เพิ่มขึ้น และการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตผสม ปอซโซลานสูงกว่าคอนกรีตปกติ

4) ความคงทน (Durability)

ความสามารถที่เด่นอีกประการหนึ่งคือการต้านทานซัลเฟต การลดลงของ C3A อันเนื่องมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้วถ่านหิน ทำให้ความเสี่ยงในการลดรอยแตกร้าวที่เป็นผลมาจากการแทรกซึมผ่านของซัลเฟตไอออนที่จะเข้าไป

ทำปฏิกิริยาโมโนซัลเฟต (ผลผลิตจาก C3A และ ยิปซัม) ลดลง หรือในกรณีของการเกิดสนิม เนื่องมาจากการซึมผ่านของคลอไรด์ การลดลงของ C3A ทำให้ประจุ คลอไรด์ลดลงรวมถึงการแตกร้าวลดลง

ปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อปูนซีเมนต์ รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จาก ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (4) และ (5) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (C-A-H)

2.2 แก้วถ่านหิน

แก้วถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีขนาดเล็กและละเอียดมาก ประกอบด้วยสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แก้วถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน โดยจะ

ปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งถ้ามีปริมาณเถ้าปลิวมากในชั้นบรรยากาศก็อาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะของอากาศได้ ในกรณีที่เถ้าถ่านหินหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้นทำให้มีน้ำหนักและตกลงกันเตาจึงได้มีการศึกษาวิจัยโดยการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกก๊าซร้อนและเถ้าปลิวออกจากกัน เพื่อนำเอาเถ้าปลิวกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำเอาเถ้าปลิวมาใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกระบวนการผลิตคอนกรีต เป็นต้น

2.2.1 กรรมวิธีผลิตเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า และ เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา เรียกว่า เถ้าก้นเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอนหรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินประมาณ 16 เท่า ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ได้แก่

- 1) แอนทราไซต์ (anthracite)
- 2) บิทูมินัส (bituminous)
- 3) ซับบิทูมินัส (sub-bituminous)
- 4) ลิกไนต์ (lignite)

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนสูง ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500 - 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน เถ้าถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นถ้ำก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผานี้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย เถ้าถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใสๆ

การเผาความร้อนปานกลาง อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 - 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอยที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือถ้ำก้นเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผานี้มีประมาณร้อยละ 70-90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด(FluidizedbedCombustion) อุณหภูมิของการเผาก้อนหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส แก้วก้อนหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากแก้วก้อนหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าแก้วก้อนหินที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วก้อนหิน

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วก้อนหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของ ก้อนหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของแก้วก้อนหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรองนอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย ความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, Lol)

2.2.3 คุณสมบัติของแก้วก้อนหิน

ก้อนหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง แก้วก้อนหินขนาดเล็กสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ แก้วก้อนหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าจึงมีทรงกลมและผิวเรียบ แก้วก้อนหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็ก ๆ ที่ผิวและอาจมีปริมาณคาร์บอน(carbon) สูง อนุภาคแก้วก้อนหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ย

ประมาณ 15-30 ไมครอน ความละเอียดของแก้วก้อนหินจากโรงไฟฟ้าที่เหมาะสมซึ่งทดสอบโดยวิธีของ เบลน(Blaine) มีความละเอียดอยู่ในช่วง 2500 ถึง 3500 cm^2/g

2.2.4 การใช้แก้วก้อนหินในงานคอนกรีต

การใช้แก้วก้อนหินในงานคอนกรีตสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานหรือใช้งานแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเนื่องจากทำให้คอนกรีตเทได้ดีขึ้นและต้องการใช้น้ำลดลง การใช้แก้วก้อนหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น กำลังอัดที่อายุเริ่มต้นของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมแก้วก้อนหินแต่จะมีกำลังอัดสูงกว่าเมื่อมีอายุนานมากขึ้น การใช้แก้วก้อนหินในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำจนอาจใช้งานไม่ได้ ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงการใช้แก้วก้อนหินเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพราะทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลง ขณะที่การพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้แก้วก้อนหินมีค่าใกล้เคียงหรืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมแก้วก้อนหิน แก้วก้อนหินนิยมใช้ในงานคอนกรีตหลากหลายหรือคอนกรีตขนาดใหญ่เพื่อลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งมักใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ค่อนข้างสูงโดยทั่วไปมักสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป

2.2.5 คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมแก้วก้อนหิน

เมื่อนำแก้วก้อนหินผสมกับซีเมนต์คอนกรีตที่ได้จะมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมดังต่อไปนี้

1) ความต้องการน้ำ แก้วก้อนหินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้

ง่ายขึ้นและต้องการน้ำลดลงเมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน ถ้าถ่านหินนอกจากลดปริมาณน้ำแล้ว ในหลายกรณียังเพิ่มความสามารถในการทำงานของมอร์ต้าและคอนกรีตได้โดยคงปริมาณน้ำไว้ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้ามาจากปูนซีเมนต์ผสมถ้าถ่านหินมีแนวโน้มดีขึ้นตามร้อยละของการแทนที่

2) ระยะเวลาก่อตัว โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพลสต์ผสมถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการแทนที่ด้วยถ่านหินทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง ถ่านหินที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นและตรงข้ามกัน ถ่านหินที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง ถ้าหากถ่านหินที่มีปริมาณ SO_3 สูงจะมีเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นมากได้

3) การเย็นน้ำ ถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์จึงทำให้เมื่อผสมถ่านหินจะทำให้มีปริมาตรของวัสดุประสานเพิ่มขึ้น มีการเย็นน้ำของเพลสต์และมอร์ต้าลดลง การเย็นน้ำของคอนกรีตต่ำกว่าเพลสต์และมอร์ต้าเนื่องจากมีปริมาณเพลสต์ต่ำกว่า คอนกรีตผสมถ่านหินจะมีการเย็นน้ำลดลงเช่นกัน เมื่อผสมถ่านหินที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากันโดยไม่ลดน้ำ คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้นเนื่องจากมีน้ำอิสระ (free water) มาก การผสมถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ยังทำให้ส่วนผสมเกาะตัวกันได้ดีเป็นผลให้อโอกาสในการเกิดการแยกตัว (segregation) ของคอนกรีตน้อยลง

4) โพร่ง การใช้ถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ขนาดและโครงสร้าง

ของโพร่งเปลี่ยนไปปฏิกิริยาในช่วงต้นขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใส่ถ่านหินทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นลดลง เป็นผลให้โพร่งของเพลสต์มีมากขึ้นเมื่อเทียบกับเพลสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้เป็นด่างเร่งปฏิกิริยา ต่อกำลังอัดในคอนกรีตที่ผสมถ่านหิน โดยแทนที่ถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25, 35, 45 และ 55 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้น 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ รวมทั้งหมด 16 ส่วนผสม

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จาก

$$\text{สมการ } m = M \times \text{Molar}$$

โดยที่ m คือ น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)

M คือ มวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

Molar คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)

2. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ตามปริมาณที่คำนวณมา

3. แบ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ละลายในน้ำ โดยเก็บสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในภาชนะที่เป็นพลาสติก

Mix	Mix proportions (kg/m ³)				
	CCR	Fly ash	Fine Agg.	Coarse Agg.	Liquid
IF15	357	63	810	920	210
IF25	315	105	795	920	210
IF35	273	147	775	920	210
IF50	210	210	755	920	210
IF15 - 0.25 M	357	63	810	920	210
IF15 - 0.50 M	357	63	810	920	210
IF15 - 0.75 M	357	63	810	920	210
IF25 - 0.25 M	315	105	795	920	210
IF25 - 0.50 M	315	105	795	920	210
IF25 - 0.75 M	315	105	795	920	210
IF35 - 0.25 M	273	147	775	920	210
IF35 - 0.50 M	273	147	775	920	210
IF35 - 0.75 M	273	147	775	920	210
IF50 - 0.25 M	210	210	755	920	210
IF50 - 0.50 M	210	210	755	920	210
IF50 - 0.75 M	210	210	755	920	210

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

2.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

วิธีการทดลองนี้เป็นขั้นตอนของการจัดทำก้อนคอนกรีตตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ ศึกษาผลของเถ้าถ่านหินที่มีผลต่อความสามารถรับแรงอัดของคอนกรีต

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการจัดเตรียมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหิน มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้มีปริมาณตามที่ออกแบบไว้ ทำความสะอาดแบบหล่อแล้วใช้น้ำมันหล่อลื่นทาแบบหล่อเพื่อป้องกันเนื้อคอนกรีตติดกับแบบหล่อ จากนั้น

เริ่มผสมส่วนผสมโดยใส่เถ้าถ่านหินลงในภาชนะที่จะทำการผสม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปผสมกับเถ้าถ่านหิน และคนจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วพักไว้ จากนั้นจึงเริ่มผสมคอนกรีตโดยใส่ส่วนผสมตามลำดับ ลำดับการป้อนวัสดุเข้าเครื่องผสมคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องผสมและคุณสมบัติของคอนกรีต โดยทั่วไปจะใส่น้ำร้อยละ 10 ตามด้วยวัสดุอื่นอย่างสม่ำเสมอและทยอยใส่น้ำโดยเหลือน้ำร้อยละ 10 สำหรับใส่ในขั้นตอนสุดท้าย ในการใส่วัสดุอื่นมักนิยมใส่มวลรวมหยาบหรือหินลงก่อน และตามด้วยทรายและปูน การใส่

วัสดุปอซโซลานจำพวก เถ้าหินให้เติมพร้อมกับปูนซีเมนต์ สำหรับสารเคมีผสมเพิ่มจะผสมกับน้ำให้เข้ากันก่อนมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบลงในภาชนะผสมแล้วทำการผสมจนเข้ากัน โดยต้องทำที่ละส่วนผสม หลังจากผสมเสร็จสิ้นแล้วนำคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้เทลงไปในแบบหล่อทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยแบ่งเทเป็น 3 ชั้นให้เทชั้นละ 1/3 ของแบบหล่อแล้วกระทุ้งคอนกรีตจำนวน 25 ครั้ง จนเต็มแบบหล่อ เมื่อทำเสร็จให้ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบและทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะแบบหล่อ แล้วบ่มคอนกรีตด้วยน้ำเป็นเวลา 14,28,60 วัน หลังจากครบอายุวัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปติดตั้งกับเครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐานแบบไฮดรอลิก และนำผลการทดลองไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

2.3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

ความสามารถรับกำลังอัด

1) เมื่อบ่มตัวอย่างคอนกรีต จนมีอายุครบตามกำหนดวัน จึงนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาพักไว้ในอากาศประมาณ 24 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบกำลังอัด

2) หลังจากที่พักก้อนคอนกรีตตัวอย่างไว้ถึงเวลาที่กำหนด นำก้อนคอนกรีตตัวอย่างติดตั้งที่เครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐานแบบไฮดรอลิก

3) กดจนก้อนคอนกรีตเกิดการวิบัติ จดบันทึกค่าความสามารถการรับแรงอัด

3.ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตโดยตรง เช่น ความสามารถในการเท ความต้องการน้ำ กำลังอัด และ ความทนทานของคอนกรีต เป็นต้น

3.1.1 ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ

ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นผงละเอียด เมื่อสัมผัสรู้สึกเถ้าถ่านหินมีเนื้อละเอียด ส่วนของปูนซีเมนต์ค่อนข้างหยาบกว่า พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งมีสีเทาอ่อน ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของเหล็ก [Lea, 1970] ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส. โดยตรง (FN-O) มีสีเทาเข้มปนน้ำตาลอ่อน และเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบด ให้มีความละเอียดสูงขึ้น (FN-F) มีสีเทาดำ

3.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และเถ้าถ่านหินซึ่งมีลักษณะเป็นฝุ่นผงขนาดเล็ก เมื่อนำมาตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องพบว่า ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ รูปร่างไม่แน่นอน และอนุภาคจะมีหลายขนาดปะปนกัน เถ้าถ่านหินเอ็น.พี.เอส.มีลักษณะอนุภาค มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม และมีความพรุนค่อนข้างสูง เนื่องจากในกระบวนการเผาเถ้าถ่านหินใช้เตาเผาแบบ FBC

(Fluidized Bed Combustion) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้เผาค่อนข้างต่ำคือประมาณ 800-900 °C ทำให้อ่านหินที่ได้ออกมามีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีความพรุนสูง [สุรพล พฤษานุถุล, 2546] ถ้าอ่านหินเอ็น.พี.เอส.ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกับก่อนทำการบด เพียงแต่มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงเท่านั้น

3.1.3 ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่าถ้าอ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส.โดยตรง (FN-O) มีค่าปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 40 ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้คือ ไม่เกินร้อยละ 34 ส่วนถ้าอ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ผ่านการบดละเอียด (FN-F) มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ลดลงจากถ้าอ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส.โดยตรง (FN-O) คือ มีค่าปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 2 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพของถ้าอ่านหินด้วยวิธีการบดช่วยให้ถ้าอ่านหินมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น และสามารถลดขนาดอนุภาคให้เล็กลงได้

ความละเอียดของถ้าอ่านหินเป็นปัจจัยบ่งชี้คุณสมบัติที่ดีอย่างหนึ่งเมื่อใช้ถ้าอ่านหินผสมคอนกรีต ความละเอียดของถ้าอ่านหินมีความสำคัญ และส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก คือเมื่อเพิ่มความละเอียดของถ้าอ่านหินให้สูงขึ้นพบว่าคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีต ทั้งด้านกำลังอัด ความทึบน้ำ และ

ความสามารถในการเทของคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย

3.1.4 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในงานการศึกษาพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.13 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 [Lea, 1970] การปรับปรุงความละเอียดของถ้าอ่านหิน เอ็น. พี.เอส. โดยการบดทำให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ถ้าอ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส. โดยตรง(FN-O) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.30 หลังจากทำการบดถ้าอ่านหินเอ็น.พี.เอส.ให้ละเอียด (FN-F) มี ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 2.35 ทั้งนี้เนื่องจากการบดทำให้อนุภาคของถ้าอ่านหินที่มีความพรุนอยู่ภายในแตกออก ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าความถ่วงจำเพาะแปรผันโดยตรงกับความละเอียด ซึ่งจากที่กล่าวไว้แล้วว่าเมื่อเพิ่มความละเอียดของถ้าอ่านหินให้สูงขึ้นพบว่าคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีต ทั้งด้านกำลังอัด ความทึบน้ำ และความสามารถในการเทของ คอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อความถ่วงจำเพาะของถ้าอ่านหินเพิ่มขึ้น คุณสมบัติที่ดีของคอนกรีต ทั้งด้าน กำลังอัด ความทึบน้ำและความสามารถในการเทของคอนกรีตก็เพิ่มขึ้นด้วย [คณะอนุกรรมการคอนกรีต และวัสดุ, 2547] อีกทั้งความถ่วงจำเพาะของถ้าอ่านหินขึ้นอยู่กับส่วนประกอบภายในถ้าอ่านหินเอง ถ้าอ่านหินที่มีปริมาณแร่เหล็กในปริมาณสูง จะมีความถ่วงจำเพาะสูงและมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก การเผา (LOI) ต่ำ ส่วนถ้าอ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนสูง จะมีความถ่วงจำเพาะต่ำและมี

อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงส่งผลให้คุณสมบัติของคอนกรีตทั้งด้านกำลังอัด และความทึบน้ำของคอนกรีตต่ำลง

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No.325 (%)
Cement Type I	3.13	NA
FN-O	2.30	40
FN-F	2.35	2

3.1.5 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Wet Chemical Analysis พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเท่ากับร้อยละ 94.43 มาตรฐาน ASTM C 150 กำหนดว่าปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 4.0 ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งที่นำมาใช้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี. เอส. FN-O และ FN-F พบว่า ผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟ

อริกออกไซด์ (Fe₂O₃) มีค่าเท่ากับร้อยละ 60.62 และ 65.46 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณ SO₃ ไม่เกินร้อยละ 5 แต่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีค่าสูงกว่าร้อยละ 6 ค่อนข้างมาก (มี LOI ประมาณร้อยละ 25) จึงไม่อาจจัดเข้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. อยู่ใน Class C ได้ตามหลักการของการ จำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี แต่เพื่อความชัดเจนในการนำเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส.ไปใช้ในงานคอนกรีต จำเป็นต้องศึกษาถึงผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และการซึมผ่าน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินดังกล่าวด้วย

เมื่อพิจารณาโดยภาพรวม พบว่า

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน FN-O มีค่าใกล้เคียงกับเถ้า ถ่านหิน FN-F ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mora และคณะ (1993) และ สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ (2538) ที่ พบว่า การคัดแยกขนาดเถ้าถ่านหินไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ใน

การศึกษา

Chemical Composition	Cement I	FN-0	FN-F
Silicon Dioxide, SiO_2 (%)	20.80	46.08	46.70
Aluminum Oxide, Al_2O_3 (%)	5.50	12.50	12.85
Iron Oxide, Fe_2O_3 (%)	3.16	2.04	5.91
Calcium Oxide, CaO (%)	64.97	3.75	4.17
Magnesium Oxide, MgO (%)	1.06	N/A	N/A
Sodium Oxide, Na_2O (%)	0.08	0.08	0.14
Potassium Oxide, K_2O (%)	0.55	0.88	1.07
Sulfur Trioxide, SO_3 (%)	2.96	0.82	0.77
Loss on Ignition, LOI (%)	2.89	26.63	25.06
Tricalcium Silicate, C_3S (%)	56.50	-	-
Dicalcium Silicate, C_2S (%)	17.01	-	-
Tricalcium Aluminate, C_3A (%)	9.23	-	-
Tetracalcium Aluminoferrite, C_4AF (%)	9.62	-	-

Remark: N/A = Not applied

FN-0 = แก้วถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ไม่ผ่านการบด

FN-F = แก้วถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ผ่านการ
บดละเอียด

3.2 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การ
ดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่
ใช้ใน ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมแก้วถ่านหิน เอ็น. พี.
เอส.

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ใน

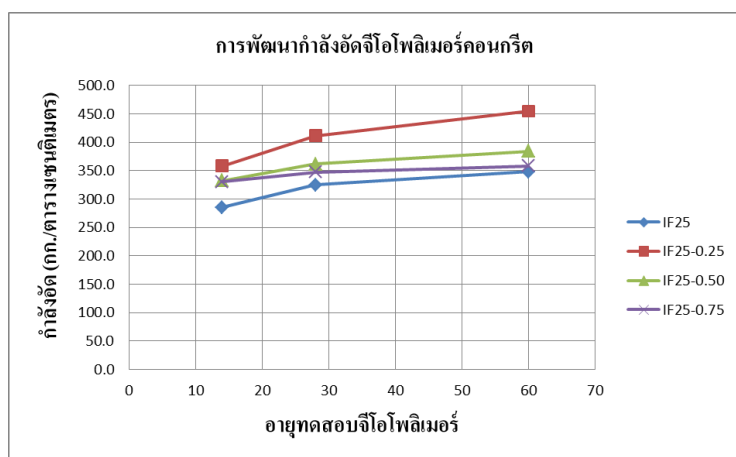
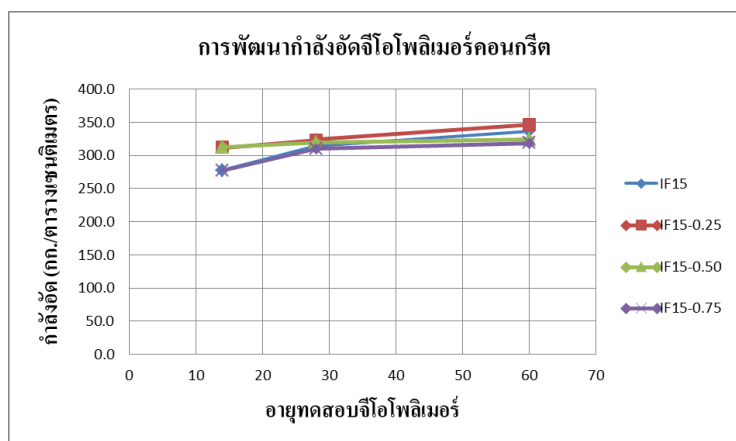
คอนกรีตที่ผสมแก้วถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.

Determination	Coarse Aggregate	Fine Aggregate
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72	2.61
Apparent Specific Gravity	2.74	2.65
Absorption (%)	0.43	0.90
Fineness Modulus	N/A	2.95
Maximum Size (mm)	20	N/A

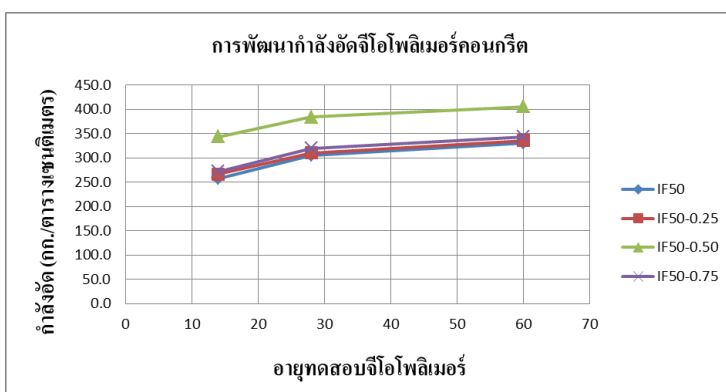
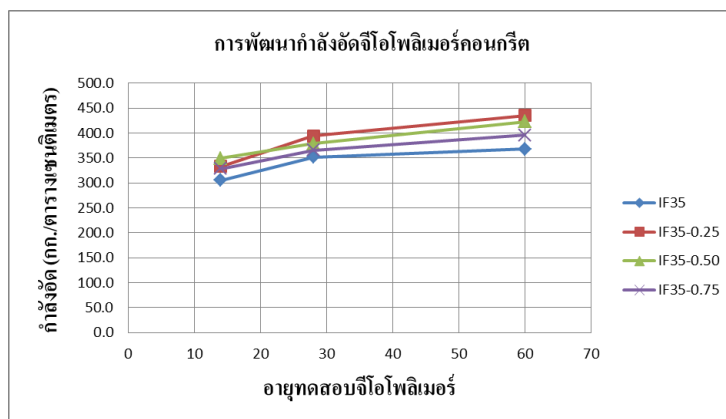
การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ตาม
ระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4.5
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีต
ผสมแก้วถ่านหิน ร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดย
น้ำหนักของวัสดุประสานกับระยะเวลามบ่ม
ตามลำดับพบว่า โดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มกำลังอัด
เพิ่มขึ้นตามระยะเวลามบ่มที่มากขึ้น และมีการ
พัฒนา กำลังอัดในช่วง 14 ถึง 28 วันแรกสูงกว่า
ช่วง 28 ถึง 60 วัน (สังเกตจากความชันของกราฟ
ในช่วง 28 วันแรกจะชันมากกว่า 28 ถึง 60 วัน)
ในช่วงอายุต้นของการบ่มกำลังอัดของคอนกรีตจะ
ขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ
เป็นหลัก หลังจากนั้นคอนกรีตเริ่มปฏิกิริยาปอซโซ
ลานมีผลให้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม

ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตเกิดขึ้นช้าและต้องใช้เวลาานาน แสดงถึงผลของวัสดุปอซโซลานต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มต่างๆ โดยพบว่าการบ่มคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดสูงขึ้นตามระยะเวลาที่นานขึ้น

การศึกษาครั้งนี้พบว่า การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน มีกำลังอัดต้นสูงอยู่แล้ว จึงมีผลให้การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุบ่ม



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุบ่ม

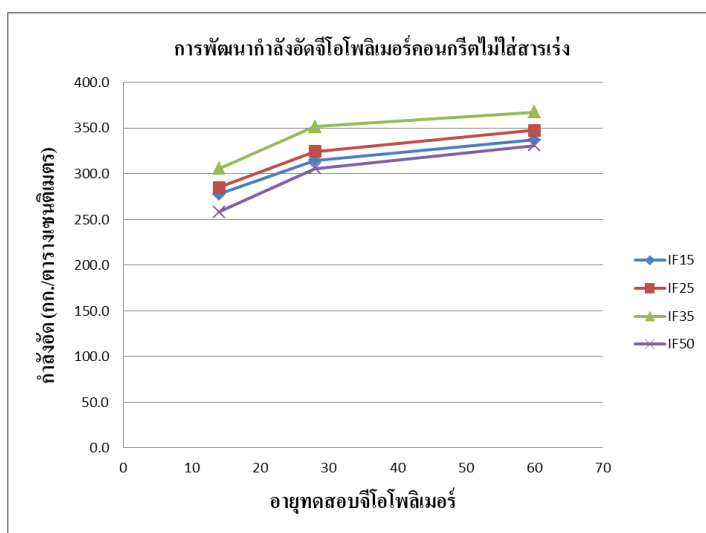
3.3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการรับกำลังอัด

จากรูป 4.6 เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 35 พบว่ามีแนวโน้มคุณสมบัติในการรับกำลังอัดได้ดีที่สุด การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 มีคุณสมบัติรับแรงอัดรองลงมา และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 และ 50 มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอิทธิพลของวัสดุปอซโซลานที่ผสมลงในคอนกรีตในอัตราส่วนที่เหมาะสมส่งผล

ให้ลดจำนวนรูพรุนและช่องว่างของคอนกรีต เพิ่มความหนาแน่น

เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ และลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตสูงกว่าปกติ แต่การใช้เถ้าถ่านหิน

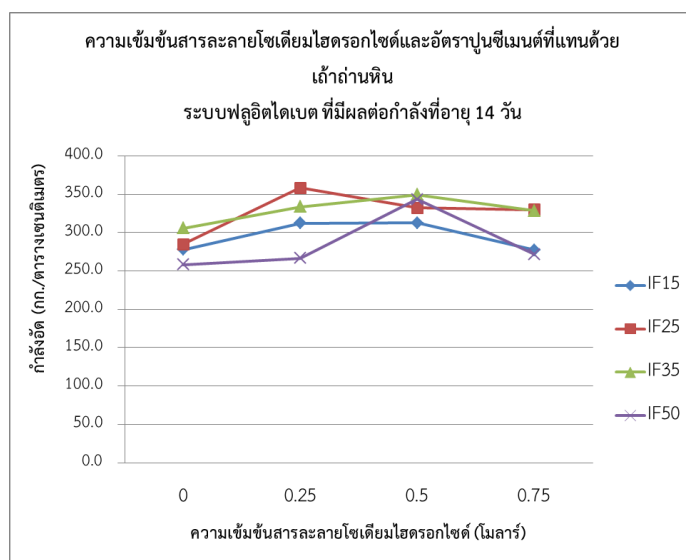
งานคอนกรีตที่ปริมาณมากเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงอัตราส่วนการทดแทน เถ้าถ่านหินนิยมใช้ในงานคอนกรีตหลาหรือคอนกรีตขนาดใหญ่ มักใช้อัตราส่วนการแทนที่โดยทั่วไปสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป



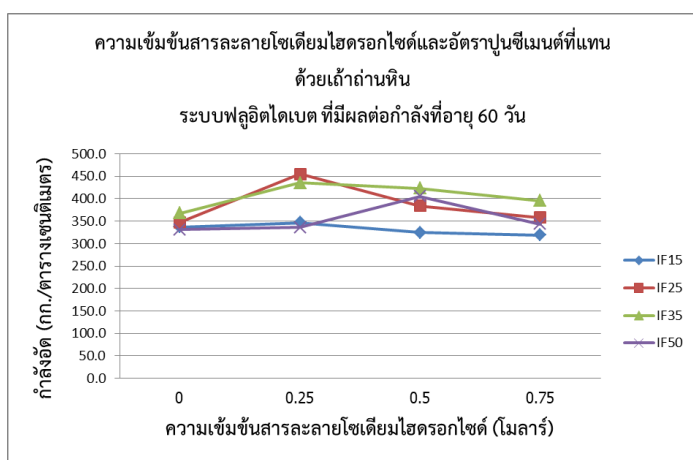
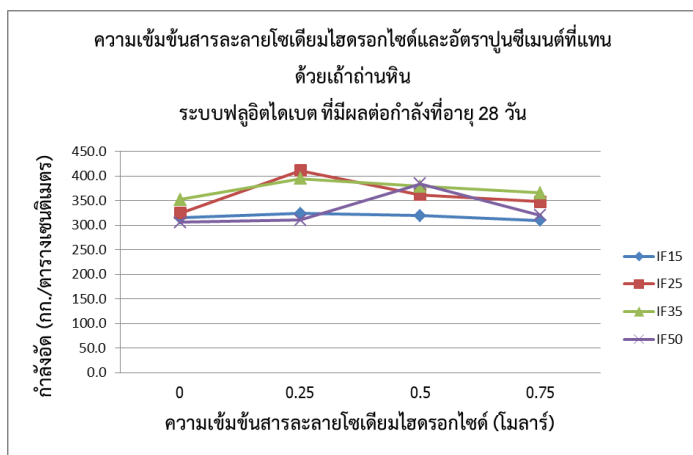
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มคอนกรีต

3.4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการรับกำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 ของน้ำหนักวัสดุประสานที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ มีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดีที่สุดในทุกช่วงอายุและทุกความเข้มข้นของคอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่างเร่งปฏิกิริยา และมีการลดลงของกำลังเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งการลดลงของกำลังอัดคอนกรีตเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูง อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการชะเอาซิลิกาจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อเจอความชื้นจะทำให้ลื่นมากขึ้นและส่งผลให้แรงยึดเกาะในเนื้อคอนกรีตลดต่ำลง ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

4.สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

4.1สรุปผลงานวิจัย

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1.1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่เกิน 0.25 โมลาร์ เหมาะสำหรับอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.25 โมลาร์ ในกลุ่มคอนกรีตดังกล่าวจะทำให้

ให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง แต่ในอัตราการแทนที่ของเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานควรใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.50 โมลาร์ เพราะเป็นความเข้มข้นที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด

4.1.2 ที่อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในอัตราการแทนที่ของเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 ของวัสดุประสาน สามารถทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ใกล้เคียงกับกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ และไม่ใส่สารเร่งปฏิกิริยา

4.1.3 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีความเหมาะสมเป็นอัตราส่วนผสมของคอนกรีตปอชโซลาน

4.1.4 การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ในกลุ่มของคอนกรีตที่แทนที่โดยเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในด้านของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานโดยไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเนื่องจากให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ถ้ำถ่านหินมาจากที่เดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์และชัดเจนยิ่งขึ้นควรจะศึกษาและเปรียบเทียบกับถ้ำถ่านหินต่างที่มาเพื่อให้การทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

4.2.2 การศึกษาครั้งนี้เป็นการใช้เพียงถ้ำถ่านหินเพียงอย่างเดียวในการทดสอบการรับกำลังอัด เพื่อให้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นเพิ่มเติม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ ที่ ปรึกษา งานวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลีที่เป็นผู้ให้แนวคิดคำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และช่วยหาแนวทางในการ แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ และสถานที่ในการทดลองสำหรับงานวิจัย คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ ท้ายนี้คณะผู้วิจัยหวังว่า ปริญา นิพนธ์เล่มนี้จะเกิดประโยชน์แก่การแก้ไข ปัญหาของปริมาณถ้ำถ่านหินที่เหลือจากการผลิตไฟฟ้าระบบฟลูอิดไดซ์เบด

6.เอกสารอ้างอิง

1. tumsurasuk. ถ้ำถ่านหิน.
Web site: <http://raungrut.tunjai.com>
2. tunjai. ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ.
Web site: <http://tunjai.com>
2. tunjai. กำลังอัดของคอนกรีต.
Web site: <http://tunjai.com>
3. yotathai. ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตก่อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปทรงลูกบาศก์.
Web site: <http://yotathai.com>
5. ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ศาสตราจารย์ ดร.ชัย จำตุรพิทักษ์กุล, (2556). ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.)
6. นายสมเกียรติ สีหะวงษ์ และนายอภิรณันท์ บุรากร. “การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนของ เหล็กเสริมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมถ้ำถ่านหินที่เผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี”
7. นางสาวมณสร อี่ยมวิจิตร, (2557). สมบัติของถ้ำถ่านหินบิพูนินสจากกระบวนการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด
8. ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, (2550). สมบัติของถ้ำถ่านหินการเผาแบบระบบฟลูอิดไดซ์เบด
9. อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, (2544). การใช้ถ้ำถ่านหินในคอนกรีต

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ-สกุล

ประวัติการศึกษา

นายพุมภพ เพ็ชร

- ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ

- ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ

- ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (วศ.บ.โยธา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 2560

ชื่อ-สกุล

ประวัติการศึกษา

นายพงศกร สังข์น้อย

- ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ

- ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ

- ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (วศ.บ.โยธา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 2560