

### คอนกรีตกำลังสูง: วัสดุที่ใช้และปัจจัยที่ควรพิจารณา

โดย

ศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

คอนกรีตกำลังสูงมีบทบาทในวงการก่อสร้างของประเทศไทยในปัจจุบันอย่างมาก เนื่องจากราคาที่ดินสูงขึ้นมากในเขต กทม. และปริมณฑล ทำให้การก่อสร้างอาคารสูงมีจำนวนมากและแน่นอนคือกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างอาคารก็สูงขึ้นมากด้วย ปัจจุบันนี้คอนกรีตเทคโนโลยีได้พัฒนาไปมาก มีการใช้สารเคมีในการลดปริมาณน้ำเพื่อให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง มีการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มกำลังอัดประลัยและความทนทานของคอนกรีตให้สูงขึ้น และการทำคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 1100 กก/ซม<sup>2</sup> สามารถทำได้ไม่ยากนัก ในฐานะเจ้าภาพจัดการแข่งขันคอนกรีตพลังช้างมาหลายปี พบว่าทีมที่เข้าแข่งขันสามารถทำกำลังอัดได้สูงมากเกินกว่า 2000 (สองพัน) กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุเพียง 24 ชั่วโมง แม้จะมีข้อโต้แย้งว่ากำลังอัดที่สูงมากกว่า 2000 กก/ซม<sup>2</sup> ที่ทำได้ยังไม่สามารถใช้งานจริงก็ตาม แต่แสดงให้เห็นว่าสามารถพัฒนาคอนกรีตให้มีกำลังอัดมากกว่า 2000 กก/ซม<sup>2</sup> ได้

ในบทความนี้กล่าวถึงวัสดุตลอดจนปัจจัยต่าง ๆ ที่ควรพิจารณาในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งผู้สนใจอาจต้องนำไปใช้ในการพิจารณาทำคอนกรีตกำลังสูงทั้งในปัจจุบันและอนาคต

#### วัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตกำลังสูง

วัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตกำลังสูงประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวม น้ำ และสารลดปริมาณน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer) นอกจากนี้นิยมผสมวัสดุปอซโซลาน เช่น ถ้ำถ่านหินหรือซิลิกาฟูมเพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานและเพิ่มกำลังอัดประลัยของคอนกรีตให้สูงขึ้น

**ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์** การทำคอนกรีตกำลังสูงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และไม่นิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ยกเว้นกรณีที่ต้องการกำลังอัดในช่วงอายุต้นสูง เช่น พวकोंกรีตอัดแรง เพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ราคาสูงจึงทำให้คอนกรีตมีราคาสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 จะทำให้คอนกรีตมีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงในช่วงอายุต้นซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงจะค่อนข้างสูงระหว่าง 400 ถึง 600 กก/ม<sup>3</sup> ซึ่งทำให้เกิดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันมาก

**มวลรวมละเอียดหรือทราย** ทรายเป็นส่วนผสมที่สำคัญในคอนกรีตกำลังสูงและส่งผลกระทบต่อสมบัติของคอนกรีตมากกว่าหิน การทำคอนกรีตกำลังสูงควรใช้ทรายหยาบที่สะอาด เม็ดกลม ผิวเรียบ และมีขนาดละเอียด เพราะทำให้ส่วนผสมคอนกรีตต้องการน้ำต่ำลง ทรายที่มีขนาดละเอียดจะให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นโดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น การใช้ทรายที่ละเอียดจะทำให้ส่วนผสมเหนียว เทและเขย่าเข้าแบบได้ยาก โดยเฉพาะ

การใช้ทรายที่ไม่มีมวลลึกลับความละเอียดต่ำกว่า 2.5 เพราะส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงมักมีปริมาณของส่วนละเอียดคือปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานสูง ACI 363 [1] แนะนำให้ใช้ทรายหยาบโดยมีปริมาณที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 ต่ำ แต่ยังคงเป็นไปตามข้อกำหนด ASTM C33 [2] จะทำให้เทได้ง่ายขึ้นและให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ดี หิน หินที่ใช้ทำคอนกรีตกำลังสูงควรเป็นหินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 1/2 นิ้ว หรือขนาด 3/8 นิ้ว เพราะการใช้หินขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวของหินมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหินและซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้เมื่อคอนกรีตรับแรง หินที่เล็กกว่าสามารถกระจายแรงให้แก่หินก้อนอื่นๆ ได้สม่ำเสมอว่าการใช้หินก้อนใหญ่ การใช้หินย่อยสามารถรับแรงได้ดีกว่ากรวดเพราะกรวดมีรูปร่างกลมและผิวเรียบ ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของกรวดกับซีเมนต์เพสต์จึงมีค่าต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตรับแรงได้ต่ำตามไปด้วย แต่การใช้หินที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมากเกินไปหรือมีรูปร่างแบนยาวจะให้ผลทางด้านลบ เพราะต้องใช้น้ำในส่วนผสมมากขึ้นเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทที่เท่ากัน ลักษณะของหินที่ดีคือ สะอาด แข็งแกร่งสูง เป็นรูปลูกบาศก์ มีเหลี่ยมและมุม รุนนอย ไม่มีรูปร่างแบนหรือยาวหรือมีค่อนข้างน้อย

**น้ำ** น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตกำลังสูงเป็นน้ำสะอาดและไม่จำเป็นต้องเป็นน้ำกลั่น น้ำประปาสามารถนำมาใช้ทำคอนกรีตกำลังสูงได้เป็นอย่างดี

**สารเคมีผสมเพิ่ม** การทำคอนกรีตกำลังสูงต้องใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อปรับคุณสมบัติของคอนกรีตให้เหมาะสมกับการใช้งานและลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำลง เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น สารเคมีพื้นฐานได้แก่สารลดปริมาณน้ำและสารลดน้ำพิเศษ เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมและเพิ่มความสามารถเทได้ของคอนกรีต อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีผสมเพิ่มในคอนกรีตกำลังสูง ควรตรวจสอบก่อนว่าสารเคมีผสมเพิ่มดังกล่าวสามารถใช้ร่วมกันได้ดีกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ สารเคมีดังกล่าวยังไม่หมดอายุ และสามารถปรับคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงได้ตามที่ต้องการ

**วัสดุผสมเพิ่มที่ไม่ใช่สารเคมี** วัสดุเหล่านี้บางครั้งเรียกว่าแร่ผสมเพิ่ม (mineral admixtures) ส่วนใหญ่ของแร่ผสมเพิ่ม ได้แก่ วัสดุปอซโซลาน วัสดุเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น วัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าถ่านหินและซิลิกาฟุ่ม เนื่องจากเป็นวัสดุปอซโซลานชั้นดีและสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์โดยคิดว่าเป็นวัสดุประสานด้วย โดยทั่วไปในการทำคอนกรีตกำลังสูงจะใช้ซิลิกาฟุ่มประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหินจะใช้ประมาณร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซิลิกาฟุ่มมีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังได้ดีและเร็ว ส่วนเถ้าถ่านหินจะช่วยในเรื่องของความสามารถในการเท ลดความร้อนของคอนกรีตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต และเพิ่มกำลังอัดประลัย นอกจากนี้ยังมีวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ที่ใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง เช่น เมทาเคลลิน เถ้าแกลบบดละเอียด เป็นต้น

**เถ้าถ่านหิน** ACI 363 [1] แนะนำว่าเถ้าถ่านหิน Class F และ Class C สามารถใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูงได้ การใช้เถ้าถ่านหินมีประโยชน์อยู่หลายประการ เช่น ปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์ต่างๆ ในเถ้าถ่านหินกับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น นอกจากนี้ขนาดอนุภาคที่เล็กของเถ้าถ่านหินจะไปอุด

ช่องว่างเล็กๆ ที่มีอยู่ในคอนกรีตทำให้ช่องว่างลดลง เกิดการอัดตัวได้ดีขึ้น ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และการที่เถ้าถ่านหินมีอนุภาคกลมทำให้คอนกรีตสามารถลื่นไหลได้ง่ายขึ้นจึงใช้น้ำในส่วนผสมน้อยลงเป็นผลให้กำลังสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตลง ทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง [3]

การใช้เถ้าถ่านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่อายุต้นๆ มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสม เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดได้ช้าแต่จะช่วยเพิ่มกำลังอัดประลัยที่อายุมากขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดขึ้นหรือการใช้เถ้าถ่านหินร่วมกับซิลิกาฟูมจะทำให้กำลังรับแรงในระยะต้นดี การทดลองแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินขนาดเล็กซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2.8 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 15 ถึง 35 ให้การพัฒนาและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงดีขึ้น ขจัดปัญหากำลังอัดต่ำในช่วงอายุต้น นอกจากนี้ยังทำให้ความสามารถเทได้ดีขึ้น แม้ว่าการใช้เถ้าถ่านหินเม็ดละเอียดอาจต้องการน้ำเพื่อเคลือบผิวที่มากกว่าเถ้าถ่านหินเม็ดใหญ่ แต่เนื่องจากเม็ดที่กลมในเถ้าถ่านหินขนาดเล็กซึ่งมีจำนวนมากกว่าสามารถช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุภายในส่วนผสมของคอนกรีตได้ดีกว่าจึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นในส่วนผสมของคอนกรีต แต่กลับช่วยให้การผสม การเทลงแบบ ตลอดจนการกระทุ้งหรือทำให้แน่นทำได้ง่ายกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินในส่วนผสม [4]

**ซิลิกาฟูม** ในปัจจุบันนิยมใช้ซิลิกาฟูมในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีต เพราะการใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีตจะให้กำลังรับแรงดีขึ้นทั้งระยะต้นและระยะปลายที่อายุมากขึ้น และช่วยลดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตอย่างมาก สิ่งที่ต้องระมัดระวังให้มากในการใช้ซิลิกาฟูมคือการผสมซิลิกาฟูมในคอนกรีตควรมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วกัน นอกจากนี้ต้องใช้สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษซึ่งควรทำการตรวจสอบว่าซิลิกาฟูมที่ใช้สามารถใช้ร่วมกับสารลดน้ำได้ดี เพื่อที่จะได้ใช้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตให้พอดีไม่มากเกินไป เนื่องจากซิลิกาฟูมมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์มากจึงควรตรวจสอบทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย

### ส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง

โดยทั่วไป คอนกรีตกำลังสูงมักมีปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานที่ค่อนข้างสูงและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงส่วนมากได้มาจากการปรับปรุง หรือดัดแปลงส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่เคยใช้หรือมีอยู่แล้วมากกว่าจะเป็นการออกแบบปฏิกิริยาส่วนผสมดังที่เคยปฏิบัติในคอนกรีตกำลังธรรมดา ตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2.8 ไมโครเมตรแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน กำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วันของคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินสูงกว่ากำลังรับของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [5] ส่วนตารางที่ 2 เป็นตัวอย่างส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงใช้หินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 3/8 นิ้ว มีซิลิกาฟูมควบแน่นแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.27 กำลังอัดที่อายุ 7 วัน, 28 วัน, และ 60 วัน ของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมควบแน่นมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาค่อนข้างมาก [5]

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียด [5]

วัสดุ	คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินละเอียด			
	เถ้าถ่านหิน 0%	เถ้าถ่านหิน 15%	เถ้าถ่านหิน 25%	เถ้าถ่านหิน 35%
ปูนซีเมนต์ (กก/ม <sup>3</sup> )	500	425	375	325
เถ้าถ่านหินแยกขนาด (กก/ม <sup>3</sup> )	0	75	125	175
ทราย (กก/ม <sup>3</sup> )	780	780	780	780
หิน (กก/ม <sup>3</sup> )	1030	1030	1030	1030
น้ำ (กก/ม <sup>3</sup> )	130	130	130	130
สารลดน้ำพิเศษ (กก/ม <sup>3</sup> )	12	12	13	14
ค่ายุบตัว (ซม)	6.4	18	22	21
W/(C+F)	0.27	0.27	0.27	0.27
$f'_c$ ที่อายุ 28 วัน (กก/ซม <sup>2</sup> )	670	775	745	760
$f'_c$ ที่อายุ 90 วัน (กก/ซม <sup>2</sup> )	725	885	850	830

หมายเหตุ เถ้าถ่านหินละเอียดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมครอน หินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 3/8 นิ้ว และสารลดน้ำพิเศษมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 50

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมด้วยซิลิกาฟูม [5]

วัสดุ	คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม			
	0%	5%	10%	15%
ปูนซีเมนต์ (กก/ม <sup>3</sup> )	554	526	499	471
ซิลิกาฟูมควบแน่น (กก/ม <sup>3</sup> )	0	28	55	83
ทราย (กก/ม <sup>3</sup> )	780	780	780	780
หิน (กก/ม <sup>3</sup> )	976	976	976	976
น้ำ (กก/ม <sup>3</sup> )	146	142	140	139
สารลดน้ำพิเศษ (กก/ม <sup>3</sup> )	6.65	14.4	18.28	22.16
ค่ายุบตัว (ซม)	19	20	19	18
W/(B)	0.27	0.27	0.27	0.27
$f'_c$ ที่อายุ 7 วัน (กก/ซม <sup>2</sup> )	580	690	710	695
$f'_c$ ที่อายุ 28 วัน (กก/ซม <sup>2</sup> )	760	835	935	880
$f'_c$ ที่อายุ 90 วัน (กก/ซม <sup>2</sup> )	835	875	950	905

### กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

โดยทั่วไปแล้วผลการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงมีความเบี่ยงเบนสูงกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา การที่ผลการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงมีความเบี่ยงเบนมากย่อมทำให้ต้องเผื่อค่ากำลังของคอนกรีตมากขึ้นกว่าปกติ ACI 318 [6] ได้กำหนดการยอมรับกำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบดังนี้

ก. กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างติดต่อกัน ต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบ

ข. กำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบได้ ต้องไม่มีตัวอย่างอันใดที่มีกำลังอัดต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้เกิน 3.4 เมกะปาสกาล

ข้อกำหนดนี้ใช้ได้ดีสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วงระหว่าง 21 ถึง 34 เมกะปาสกาล ในกรณีที่ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงไม่เป็นไปตามข้อกำหนดควรดูรายละเอียดของผลการทดสอบและข้อมูลอื่นประกอบการตัดสินใจ เช่น เมื่อพบว่าผลการทดสอบกำลังอัดของบางตัวอย่างต่ำกว่า 3.4 เมกะปาสกาลไม่มากนักจะต้องตรวจสอบส่วนผสมและปรับส่วนผสมให้มีกำลังอัดตามที่ต้องการในการทำงานต่อไป และสำหรับคอนกรีตที่เทไปแล้วให้พิจารณาการพัฒนากำลังและอายุการใช้งาน เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมักมีการพัฒนากำลังที่ดีแม้ว่าจะมีอายุมากกว่า 28 วันขึ้นไป และหากการทำการก่อสร้างอาคารดังกล่าวสามารถยึดออกไปได้ก็ไม่จำเป็นต้องทุบทิ้งและทำใหม่ เพราะกำลังของคอนกรีตอาจสูงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักเมื่อเปิดใช้งานอาคารดังกล่าว ทั้งนี้อาจใช้การทดสอบการรับน้ำหนักตามมาตรฐานระบุเพื่อให้มั่นใจในความแข็งแรงประกอบด้วย

### อายุที่ใช้ทดสอบคอนกรีตกำลังสูง

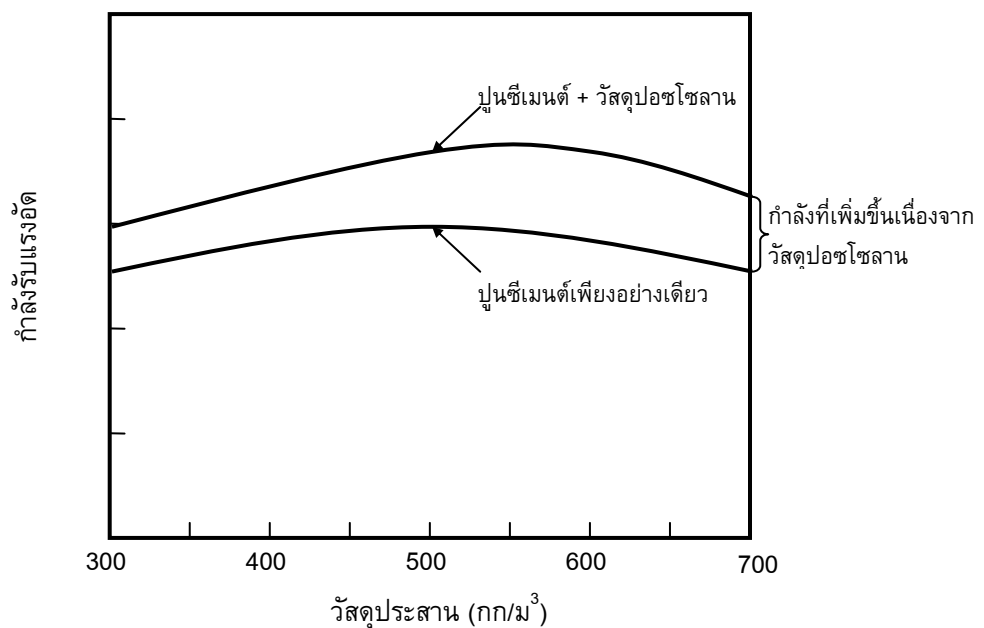
คอนกรีตกำลังสูงมักมีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานอยู่ด้วย ซึ่งจะให้กำลังแก่คอนกรีตเพิ่มขึ้นแม้ว่าอายุของคอนกรีตจะมากกว่า 28 วัน ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจึงไม่ควรใช้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน แต่ควรกำหนดกำลังอัดที่อายุ 56 หรือ 90 วัน และทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเพื่อดูแนวโน้มว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 56 หรือ 90 วันจะมีกำลังสูงตามที่ต้องการ เพราะคอนกรีตกำลังสูงนิยมใช้เทเสาหรือฐานรากซึ่งองค์อาคารดังกล่าวว่าจะรับน้ำหนักอย่างเต็มที่ตามที่ออกแบบไว้ต้องใช้เวลาในการก่อสร้างอาคารมากกว่า 6 เดือนขึ้นไป ซึ่งกรณีเช่นนี้การใช้ถ้ำถ่านหินหรือวัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงจะทำให้ประหยัดและมีกำลังอัดประลักษ์ตามอายุที่ต้องการ

สำหรับงานที่ต้องการคอนกรีตมีกำลังที่สูงมากในช่วงอายุต้น เช่น งานคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งต้องการกำลังอัดที่สูงในช่วงอายุ 12 ถึง 24 ชั่วโมงหรืองานซ่อมแซมถนนซึ่งต้องการกำลังอัดที่สูงในช่วงอายุประมาณ 1 หรือ 3 วัน งานเหล่านี้ควรใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 แทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และไม่ควรรใช้ถ้ำถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีต

### ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณวัสดุประสาน และน้ำ

คอนกรีตกำลังสูงมักมีปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา ปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 400 ถึง 600 กก/ม<sup>3</sup> การใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้กำลังรับแรงของคอนกรีตลดลงดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในอัตราที่พอเหมาะสามารถเพิ่มปริมาณวัสดุประสานใน

ส่วนผสมและทำให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณวัสดุประสานที่ให้กำลังอัดสูงสุดขึ้นอยู่กับ ชนิดของปูนซีเมนต์ สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ ชนิดของทรายและหิน รวมทั้งวัสดุปอชโซลานที่ใช้ เนื่องจากวัสดุปอชโซลานจัดเป็นวัสดุประสานด้วย ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์บวกวัสดุปอชโซลาน) แทนการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ในสารเคมีผสมเพิ่ม เช่น สารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตจะมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย เพราะฉะนั้นปริมาณน้ำที่ใช้จริงต้องรวมปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสารเคมีผสมเพิ่มเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในคอนกรีตกำลังสูงมักอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.40



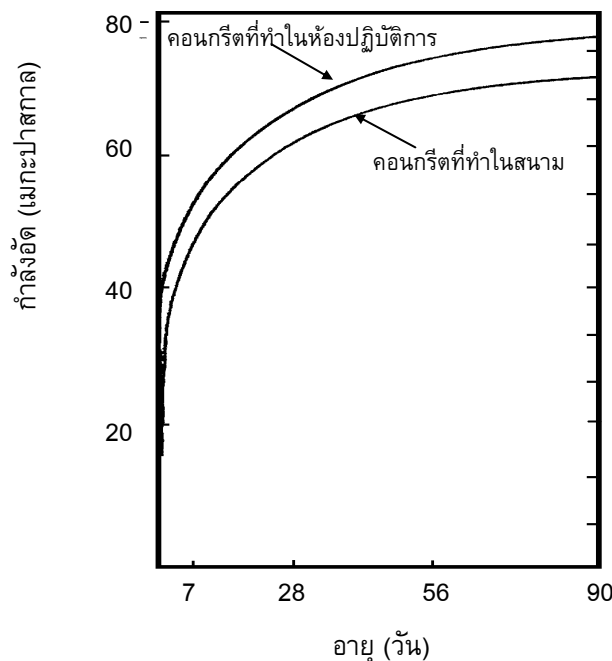
รูปที่ 1 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง [5]

### การทดลองผสมคอนกรีตกำลังสูง

เมื่อกำหนดส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงแล้ว ควรทำการลองผสมเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งด้านกำลังอัด การยุบตัว และคุณสมบัติอื่นๆ กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานค่าหนึ่งๆมีค่าแปรผันได้อย่างมากขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ วัสดุปอชโซลาน มวลรวม และสารผสมเพิ่ม การใช้เถ้านหินที่มีดัชนีกำลังที่แตกต่างกันในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงย่อมให้กำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกันได้ เพราะดัชนีกำลังของเถ้านหินอาจมีค่าร้อยละ 75 ถึงสูงกว่าร้อยละ 110 ขึ้นไป นอกจากนี้การใช้ซิลิกาฟูมซึ่งมีดัชนีกำลังสูงได้ถึงร้อยละ 200 ย่อมส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตอย่างมาก [7]

เมื่อได้ทดสอบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงในห้องปฏิบัติการแล้ว ควรลองผสมส่วนผสมคอนกรีตดังกล่าวในสนามอีกครั้ง เพราะโดยทั่วไปกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้ในห้องปฏิบัติการมักมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมในสนาม ซึ่งมีสาเหตุมาจากการตวงส่วนผสม การผสม การเท การทำให้แน่น และการบ่มคอนกรีต เป็นต้น เพราะการ

ดำเนินการดังกล่าวกระทำในสนามไม่ดีเท่ากับทำในห้องปฏิบัติการ รูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการผสมในห้องทดลองกับที่ผสมในสนาม ดังนั้นต้องออกแบบให้คอนกรีตที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าสูงเพียงพอที่จะชดเชยค่ากำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการผสมหรือทำคอนกรีตในสนาม [8] เมื่อเลือกส่วนผสมของคอนกรีตได้แล้วควรดำเนินการทดลองต่อไปเพื่อเก็บข้อมูลที่จำเป็น เช่น กำลังอัดของคอนกรีตตามอายุต่างๆ ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัว การเยิ้ม น้ำ การแยกตัว การก่อตัวของคอนกรีต และ ความหนาแน่นของคอนกรีตกำลังสูง เพื่อใช้เป็นค่าในการควบคุมคุณภาพของคอนกรีต



รูปที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ทำในห้องทดลองและที่ทำในสนาม [8]

### ความสามารถในการเทของคอนกรีตกำลังสูง

ความสามารถในการเทของคอนกรีตกำลังสูงมักใช้ค่ายุบตัวของคอนกรีตในการกำหนด แต่ข้อเสียของการทดสอบโดยวิธียุบตัวของคอนกรีต คือ ไม่เหมาะที่จะใช้กับคอนกรีตที่มีการยุบตัวต่ำมากหรือสูงมาก ในการทดสอบคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวต่ำมากหรือสูงมากควรเลือกใช้วิธีเวลาของวีบีจะให้ค่าที่ดีกว่า

คอนกรีตกำลังสูงที่ดีควรมีความหนาแน่นสูงสามารถกระทุ้งหรือเขย่าหรือทำให้แน่นได้อย่างเต็มที่โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องเทในบริเวณที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น โดยทั่วไปแล้วมักกำหนดค่ายุบตัวของคอนกรีตประมาณ 10 ซม. อย่างไรก็ตามก่อนการกำหนดค่ายุบตัวของคอนกรีตควรพิจารณาถึงรายละเอียดของแบบหล่อคอนกรีต และระยะแคบที่สุดของเหล็กเสริม การเลือกใช้ค่ายุบตัวที่ต่ำกว่า 7.5 ซม. ต้องมีเครื่องมือในการช่วยเขย่าหรือทำคอนกรีตให้แน่น

คอนกรีตกำลังสูงมีแนวโน้มที่จะสูญเสียค่าการยุบตัวที่เร็วกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา ดังนั้นจึงควรตรวจสอบระยะเวลาที่สามารถเทคอนกรีตได้โดยไม่มีปัญหาเพื่อจะได้กำหนดการเทคอนกรีตให้เสร็จก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว ซึ่งหากคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะทำให้ทำงานได้ยากหรือไม่สามารถเทคอนกรีตเข้าแบบได้

คอนกรีตกำลังสูงมักมีความเหนียวหนืดมากกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากมีการใช้วัสดุละเอียดในส่วนผสมสูง การใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่มากจะทำให้คอนกรีตสดเหนียวหนืด เทเข้าแบบได้ยาก และเป็นผลเสียต่อการไหลของคอนกรีต ในการกำหนดส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงต้องใช้วัสดุประสานเท่าที่จำเป็น โดยที่ยังมีกำลังอัดสูงตามที่ต้องการ ควรใช้มวลรวมหยาบหรือหินให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ แต่ยังคงมีความสามารถในการเทตามที่ต้องการ ในกรณีที่คอนกรีตกำลังสูงที่ออกแบบและนำมาใช้ในสนามมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างผิดปกติควรทำการตรวจสอบส่วนผสมที่ซั้งตวงไว้ และหาสาเหตุอื่นที่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าว เช่น มีการก่อตัวผิดปกติของปูนซีเมนต์หรือไม่ เพื่อจะได้ดำเนินการแก้ไข

### การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีตเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะคอนกรีตกำลังสูงในช่วงอายุต้น และควรทำการบ่มด้วยน้ำ เพราะคอนกรีตกำลังสูงจะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ค่อนข้างต่ำ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.40 มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงอย่างมากถ้าหากน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ การบ่มด้วยน้ำทำให้คอนกรีตสามารถดูดน้ำจากภายนอกเข้าทำปฏิกิริยาได้ โดยเฉพาะในบริเวณใกล้กับผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.29 ใช้หินที่อยู่ในสภาพอิมมัวแห้งและบ่มในน้ำมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงกว่าคอนกรีตเดียวกันแต่ใช้หินที่แห้งและบ่มในกระสอบชื้นประมาณ 60 ถึง 70 กก/ซม<sup>2</sup> [9]

หวังว่าท่านที่สนใจเรื่องคอนกรีตกำลังสูง จะสามารถนำความรู้จากบทความนี้ไปประยุกต์ใช้งาน และสามารถทำคอนกรีตกำลังสูงที่มีกำลังสูงได้ตามต้องการครับ

\*\* รายละเอียดของบทความนี้ส่วนใหญ่คัดมาจากหนังสือ “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต” พิมพ์ครั้งที่ 7 โดย ปรินญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล สำหรับผู้ที่สนใจรายละเอียดเพิ่มเติม สามารถหาดูได้จากบรรณานุกรมที่ให้ไว้ข้างล่างครับ

### บรรณานุกรม

1. American Concrete Institute, ACI 363R-92 (Reapproved 1997): State-of-the-Art Report on High Strength Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan, 2000.
2. American Society for Testing and Materials, ASTM C33-01: Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 10-17.
3. Lane, R. O. and Best, J. F., Properties and Use of Fly ash in Portland Cement Concrete, Concrete International: Design & Construction, 1982, Vol. 4, No. 7, 81-92.



4. เอกภพ อังศุวัฒนา, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรรณิสรากุล, พยุร เกตุกราย, พิชัย นิมิตยงสกุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย, และ ทิน เกตุรัตน์ นบวร, การใช้เถาถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะมาทำคอนกรีตกำลังสูง, เอกสารประกอบการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 4, พ.ศ. 2540, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 206-215
5. วีรราช ลีเกียรติกุล และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, การประยุกต์ใช้เถาถ่านหินในงานคอนกรีตกำลังสูง, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการใช้เถาลอยในงานคอนกรีตครั้งที่ 4, พ.ศ. 2543, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 50-64
6. American Concrete Institute, ACI 318M-95: Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 3, Michigan, 2000.
7. Wolsiefer, J., Ultra High-Strength Field Placeable Concrete with Silica Fume Admixture, Concrete International: Design & Construction, 1984, Vol. 6, No. 4, 25-31.
8. Blick, R.L., Petersen C. F., and Winter M. E., Proportioning and Controlling High Strength Concrete, Proportioning Concrete Mixes, SP-46, American Concrete Institute, Detroit, 1974.
9. Klieger, P, Early High-Strength Concrete for Prestressing, Proceedings of the World Conference on Prestressed Concrete, San Francisco, 1957, A-1 to A5-14.