

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ททั่วไป

เป้าหมายหลักของการหาสัดส่วนผสมหรือการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตคือ เพื่อเลือกวัสดุผสมคอนกรีตที่เหมาะสมอันได้แก่ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ น้ำยาผสมคอนกรีต ให้เป็นไปตามข้อกำหนด และวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ส่วนการกำหนดหาสัดส่วนของวัสดุผสมนี้เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามข้อกำหนดและการใช้งานทั้งในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ในราคาที่เหมาะสมที่สุด ในกรณีวิจัยนี้ได้ใช้ข้อกำหนดคือมาตรฐานการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของสถาบันคอนกรีตอเมริกาก็เป็นมาตรฐานหนึ่งที่ได้รับคามนิยมใช้กันมากในประเทศไทย เนื่องจากเป็นวิธีการนำเสนอที่เข้าใจง่าย สะดวกต่อการนำไปใช้ มีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป

เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มเป็นส่วนมากเพื่อให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งยังมีสารผสมเพิ่มอื่นๆอีกคือ เถ้าลอย ซิลิกาฟูม จีโละ และสารปอซโซลานจากธรรมชาติ อาทิเช่น เถ้าภูเขาไฟ จีเถ้ากลบ เถ้าเปลือกถั่ว ทำให้การทำนายคุณสมบัติของคอนกรีตมีความยุ่งยากมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ จะศึกษาในกรณีของการใส่สารผสมเพิ่มซึ่งก็คือเถ้าลอย ลงในส่วนผสมคอนกรีต เถ้าลอยจัดเป็นประเภทสารปอซโซลาน มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับคอนกรีต แต่ปัญหาสำคัญของเถ้าลอยที่ทำให้การทำนายคุณสมบัติของคอนกรีตมีความยุ่งยากคือ ความไม่แน่นอนขององค์ประกอบทางเคมีในเถ้าลอย ด้วยเหตุที่เถ้าลอยคือกากวัสดุที่ได้จากการใช้ถ่านหินในโรงผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นคุณภาพของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงาน ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้เผาและระบบการดักจับเถ้า วัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตจำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติได้มาตรฐานตามที่กำหนดและมีความแปรผันน้อย จึงจะทำให้การทำนายกำลังอัดของคอนกรีตมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งในประเทศไทยแหล่งที่ผลิตเถ้าลอยได้มาตรฐานของวัสดุปอซโซลาน มีการควบคุมคุณภาพได้ค่อนข้างคงที่ และมีปริมาณมากที่สุดในประเทศก็คือโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษา เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานกับกำลังอัด สำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตด้วยวิธีการของเอซีไอ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวกับเถ้าลอย คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และวิธีการออกแบบส่วนผสมของมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกา

2.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย หรือ เถ้าถ่านหิน จัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภทสังเคราะห์ เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เถ้าลอยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภท F และ ประเภท C โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหิน ดังนี้

เถ้าลอยประเภท F เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และ อะลูมินาออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาถ่านหินประเภท แอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ ซึ่งมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์น้อยหรือแทบจะไม่มี แต่ยังมี คุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน

เถ้าลอยประเภท C เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และ อะลูมินาออกไซด์ อยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ และ ซับบิทูมินัส มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15-23 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง ซึ่งมีคุณสมบัติของซีเมนต์และปอซโซลานในตัวเอง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้จะพัฒนาได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้นเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยประเภท F

ตารางที่ 2.1 เป็นตารางแสดงการเปรียบเทียบประเภทของเถ้าลอย โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหิน แต่ยังสามารถทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งานได้โดยอาศัยข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอย ซึ่งกำหนดโดย ASTM C 618-97 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-93

ที่มา : ASTM C618-93 (1993)

คุณสมบัติ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ประเภท F	ประเภท C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ร้อยละ	≥ 70.0	50.0 – 70.0
SO_3 มากที่สุด ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น มากที่สุด ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ มากที่สุด ร้อยละ	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง น้อยที่สุดที่อายุ 7 วันหรือ 28 วัน ร้อยละ	75.0	75.0

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C 618-97

ที่มา : ASTM C 618-97 (1997)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ประเภท F	ประเภท C
ความละเอียด (Fineness) : ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก มากที่สุดร้อยละ	34	34
ดัชนีกำลัง (Strength activity index) : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 7 วัน น้อยที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม 28 วัน น้อยที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75 75	75 75
ความต้องการน้ำ (Water requirement) : มากที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว (Soundness) : การขยายตัวหรือการหดตัวโดยวิธี Autoclave มากที่สุดร้อยละ	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement) : - ความหนาแน่น มากที่สุดจากค่าเฉลี่ยร้อยละ - ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 มากที่สุดจากค่าเฉลี่ยร้อยละ	5 5	5 5
ผลคูณระหว่าง ร้อยละของน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา กับปริมาณร้อยละของที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (Multiple factor) : มากที่สุด	255	-
การหดตัว (Drying shrinkage) : ของแท่งมอร์ตาร์ที่ 28 วัน ที่แตกต่างจากตัวควบคุมมากที่สุดร้อยละ	0.03	0.03

อย่างไรก็ตาม คุณภาพและปริมาณของเถ้าลอยสามารถแปรผันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงผลิตกระแสไฟฟ้า ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้เผาและระบบการดักจับเถ้า ดังนั้น เถ้าลอยที่ได้ในแต่ละประเทศจึงมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน

2.2.1 ลักษณะการผสมเถ้าลอยลงในคอนกรีต

การผสมเถ้าลอยลงในคอนกรีตมี 3 ลักษณะด้วยกัน คือ

ก. การแทนที่ โดยการใชเถ้าลอยลิกในผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ จากการศึกษาของวราภรณ์

คุณวานากิจ (2537) พบว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 0-35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสานจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์และส่วนผสมในการทำคอนกรีต

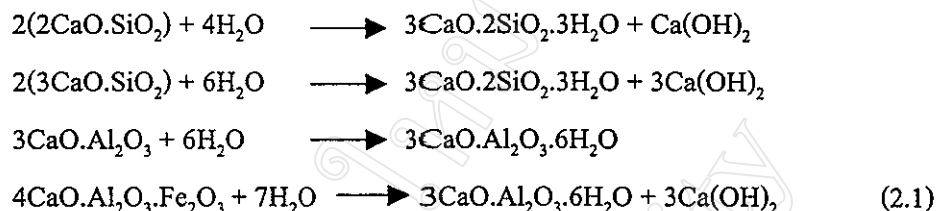
ข. การผสมเพิ่ม โดยการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมเพิ่มในงานคอนกรีต วิธีการนี้มักนิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ ลดการเย็นของคอนกรีต คอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ด้วยวิธีนี้มักจะให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ทั้งนี้เพราะในเนื้อคอนกรีตมีช่องว่างและความต้องการน้ำในเนื้อคอนกรีต การเติมอนุภาคที่มีเม็ดละเอียดของเถ้าลอยลิกไนต์เข้าไบนั้นจะทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลง นอกจากนี้ผิวและรูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีลักษณะเรียบและเป็นทรงกลมจะช่วยส่งเสริมการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต

ค. การแทนที่และผสมเพิ่มรวมกัน โดยยึดหลักเพื่อปรับปรุงกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ให้ดีขึ้นกว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และยังต้องการจะประหยัดการใช้ปริมาณซีเมนต์เพื่อลดราคาการผลิตคอนกรีตให้ถูกลง จึงใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง เพื่อเร่งการเพิ่มกำลังของคอนกรีต และจากการศึกษาของวารกรณ์ คุณวานากิจ (2537) พบว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของซีเมนต์แทนที่ซีเมนต์ที่ลดลงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7.2 ที่การยุบตัว 2.5 นิ้ว

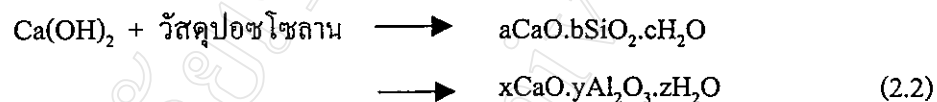
2.2.2 ปฏิกริยาเคมีของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งได้ผลผลิตคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดจากเถ้าลอยจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของซีเมนต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration of Portland cement)



และเมื่อมี $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ปฏิกิริยาปอซโซลานก็จะเกิดดังสมการ



อย่างไรก็ตาม ชัชวาล เศรษฐบุตร (2537) รายงานว่ากลไกของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะซับซ้อนกว่าที่นำสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง ถ้าลดยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก แต่จะหน่วงแก้ไข้ขึ้นอยู่กัปริมาณซิลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในถ้าลอย

2.2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมถ้าลอย

ก. คุณสมบัติของคอนกรีตสด

จาก ACI Committee 226 (1995) ได้กำหนดมาตรฐานการใช้ถ้าลอยในงานคอนกรีตเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตสดผสมถ้าลอยดังนี้

ความสามารถทำงานได้ ปริมาตรของเพสที่มีซีเมนต์ผสมถ้าลอยจะมากกว่าปริมาตรของเพสที่มีเพียงซีเมนต์อย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของถ้าลอยมีน้อยกว่าซีเมนต์ ซึ่งปริมาตรของเพสที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยปรับปรุงสภาพพลาสติกและความเชื่อมแน่น (Plasticity and Cohesiveness) ของคอนกรีตให้ดีขึ้น นอกจากนี้ปริมาณ SiO_2 ที่มากกว่า CaO ในถ้าลอยยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพการกระจายอนุภาคของซีเมนต์และถ้าลอยในเพสที่มีอัลคาไลสูงได้อีกด้วย

ถ้าลอยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของเพส เนื่องจากอนุภาคของถ้าลอยมีรูปร่างกลมจะช่วยในการไหลลื่นดีขึ้น ซึ่งทำให้ความต้องการน้ำในการผสมคอนกรีต

ลดลง นอกจากนี้ถ้าลอยในประเภท F ยังช่วยลดอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใส่ถ้าลอยในสภาวะอากาศร้อนได้อีกด้วย

การเย็บ การใช้ถ้าลอยในคอนกรีตจะช่วยลดการเย็บโดยอนุภาคของถ้าลอยซึ่งมีความละเอียดจะเข้าไปทดแทนช่องว่างที่ขาดหายไปของมวลรวมละเอียดและช่วยกันช่องเพื่อไม่ให้เกิดการเย็บของน้ำ

ความสามารถในการปั๊ม ถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตจะช่วยให้ความสามารถในการปั๊มดีขึ้น เนื่องจากรูปร่างของถ้าลอยมีลักษณะกลมทำให้ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมด้วยกันและระหว่างคอนกรีตกับท่อปั๊ม

เวลาของการก่อตัว การใช้ถ้าลอยอาจทำให้คอนกรีตมีการก่อตัวช้าลง โดยเฉพาะถ้าลอยในประเภท F จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นโดยที่ถ้าลอยจะหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มแรกของ C_3S ในขณะที่ถ้าลอยประเภท C อาจจะไม่เพิ่ม, ลด หรือไม่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวเลยก็ได้

ข. คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

จาก ACI Committee 226 (1995) ได้กำหนดมาตรฐานการใช้ถ้าลอยในงานคอนกรีตเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตผสมถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วดังนี้

กำลังอัดและอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลัง คอนกรีตที่ผสมถ้าลอยโดยการแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม สามารถเพิ่มกำลังอัดได้เมื่ออายุคอนกรีตมากกว่า 28 วัน เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมถ้าลอย โดยถ้าเป็นถ้าลอยประเภท F การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมถ้าลอย แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังจะมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และให้กำลังอัดที่สูงกว่าเมื่ออายุมากกว่า 28 วัน สำหรับคอนกรีตประเภท C จะให้กำลังอัดในช่วงแรกสูงกว่า ถ้าลอยในประเภท F และอาจจะสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมถ้าลอย

โมดูลัสความยืดหยุ่น จากการศึกษาของสถาบัน Tennessee Valley Authority พบว่าถ้าลอยมีผลต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตน้อยมากเมื่อเทียบกับผลด้านกำลัง โดยคอนกรีตผสมถ้าลอยจะให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมถ้าลอยเพียงเล็กน้อย ซึ่งผล

ของการศึกษาสรุปได้ว่า ซีเมนต์และมวลรวมมีผลต่อ โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตมากกว่าเถ้าลอย

การคืบ ผลของเถ้าลอยต่อการคืบของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับกำลังและอัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเมื่อให้น้ำหนักกดทับที่อายุไม่เกิน 28 วัน พบว่ามีการคืบเกิดขึ้นมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย เนื่องจากคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังน้อยกว่าขณะถูกน้ำหนักกดทับ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Lane และ Best , Ghosh และ Timusk พบว่าคอนกรีตที่ผสมกับไม่ผสมเถ้าลอยที่มีกำลังและอายุเท่ากัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีการคืบเกิดขึ้นน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตที่มีต่อเหล็ก แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตที่มีต่อเหล็กจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเหล็กสัมผัสกับคอนกรีต ระยะฝั่งลึก และความหนาแน่นของคอนกรีต การใช้เถ้าลอยจะช่วยเพิ่มปริมาตรของเพสต์ และช่วยลดการแยก ดังนั้นโอกาสที่เหล็กจะสัมผัสกับคอนกรีตจึงมีมากขึ้น ผลก็คือเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตยึดเหนี่ยวกับเหล็กได้ดียิ่งขึ้น

การต้านทานการกระแทก การต้านทานการกระแทกของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของปูนทรายและความแข็งแรงของหิน ดังนั้นเถ้าลอยจึงมีผลช่วยให้การต้านทานการกระแทกของคอนกรีตดีขึ้นเนื่องจากช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีตดีขึ้นนั่นเอง

การต้านทานการสึกกร่อน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะต้านทานการสึกกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอย เนื่องจากมีสภาพที่บ่มน้ำกว่าทำให้การซึมผ่านของสารเคมีเป็นไปได้ยาก

อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในคอนกรีต การใช้เถ้าลอยผสมคอนกรีตจะช่วยให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตลดลง เนื่องจากความร้อนในคอนกรีตส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และน้ำ การใส่เถ้าลอยจะช่วยให้ลดปริมาณซีเมนต์ลงและคุณสมบัติของเถ้าลอยเองยังช่วยหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ดังนั้นความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงลดลงด้วย

ปริมาณฟองอากาศ การใส่เถ้าลอยในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีฟองอากาศลดลง เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็กจะแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างช่องว่างแทนที่อากาศทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น และช่วยให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่อาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับ

คอนกรีตที่ต้องการปริมาณฟองอากาศ อย่างเช่น คอนกรีตที่ต้องการต้านทานการแข็งตัวและการละลายของน้ำ (Freezing and Thawing) ในพื้นที่เขตหนาว นอกจากนี้ ปริมาณคาร์บอน ปริมาณการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ ค่าความละเอียดและสารอินทรีย์ในเถ้าลอย ยังมีผลต่อสารกักกระจายฟองอากาศ ทำให้การควบคุมปริมาณฟองอากาศทำได้ยาก

ค. การทดสอบความสามารถในการทำงานได้

ในการวิจัยนี้ได้ใช้ Vebe Test ในการทดสอบความสามารถในการเทได้ซึ่ง ACI Committee 211 (1992) ได้เสนอหลักการดังนี้

Loaded Vebe Time เป็นเวลาที่ใช้เขย่าคอนกรีตสดที่ตั้งเป็นรูปกรวยในภาชนะเหล็กทรงกระบอกเปลี่ยนรูปร่าง และให้น้ำปูนทรายไหลเอ่อขึ้นมาสัมผัสเต็มพื้นที่ผิวของแผ่นพลาสติกใสและแข็ง ซึ่งวางทับเต็มผิวหน้าคอนกรีตในภาชนะบรรจุคอนกรีตสดซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 24 ซม. สูงประมาณ 20 ซม. มีความจุ 9 ลิตร ในการทดสอบจะตักคอนกรีตสดใส่ slump cone เพื่อให้คอนกรีตเป็นรูปกรวย เมื่อชัก slump cone ออกแล้ว ต่อไปวางแผ่นพลาสติกกลมใส ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22.9 ซม.หนา 1.27 ซม. ทับลงบนคอนกรีตสด บนแผ่นพลาสติกกลมใสจะวางน้ำหนัก 10 กก.ทับ แล้วจึงเริ่มเขย่าด้วยแท่นที่สั่นสะเทือนประมาณ 3,000 รอบ/นาที และมีระยะแกว่ง (amplitude) 0.5 มม. พร้อมกับเริ่มจับเวลาเมื่อน้ำปูนทรายเอ่อขึ้นมาเต็มผิวของแผ่นพลาสติกใสจึงบันทึกเวลานั้นไว้เป็น Vebe Time มีหน่วยเป็นวินาที

การวัด Vebe Time เป็นการวัดที่สันนิษฐานได้ว่าเวลาที่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดคอนกรีตสดให้แน่น ในส่วนผสมที่แห้งมากวิธีนี้ใช้ในการพิจารณาถึงความแตกต่างของความชื้นเหลวของคอนกรีตสด และสมชาย กกก้าแหง (2537) รายงานว่าวิธีนี้มีลักษณะโดยนัยสำคัญเป็นการวัดหาความชื้นเหลวของคอนกรีตสดที่พอเหมาะสำหรับการบดอัดในสนาม โดยมุ่งควบคุมให้ได้ลักษณะคอนกรีตสดที่สามารถทำงานคลุกเคล้าและบดอัดในสนามได้โดยสะดวก เพื่อให้ได้คอนกรีตเนื้อแน่นตามที่ต้องการ

2.3 การออกแบบคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ตามมาตรฐาน ACI211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992)

ขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐานอเมริกา ACI 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) นี้ จะแสดงวิธีการออกแบบสำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ (No-Slump Concrete) โดยที่ค่า Vebe Test อยู่ระหว่าง 0-32 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือกค่าความชันเหลวและกำลังของคอนกรีตที่ต้องการ

ค่าความชันเหลวของคอนกรีตที่ต้องการแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดหินใหญ่สุด

ขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งานขนาดโตสุดของหินนี้ควรเล็กกว่าช่องว่างระหว่างเหล็กเสริม แต่ก็ไม่ควรเล็กเกินไป จะมีผลต่อความทนทานของคอนกรีตในอนาคต

ขั้นตอนที่ 3 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต้องการขึ้นอยู่กับความทนทานตามตารางที่ 2.4 และขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ตามตารางที่ 2.5 โดยจะเลือกส่วนที่ต่ำกว่า

ขั้นตอนที่ 4 ประมาณปริมาณน้ำและอากาศ

ปริมาณน้ำที่ต้องการจะเป็นตัวกำหนดค่าความชันเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโตสุดของหิน โดยสามารถหาได้จากตารางที่ 2.6

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาปริมาณของปูนซีเมนต์

จากขั้นตอนที่ 3 และ 4 จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กับปริมาณน้ำที่ต้องการ จะสามารถหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะใช้ได้

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบ

โดยตารางที่ 2.7 จะเป็นอัตราส่วนของปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อปริมาณของคอนกรีต โดยขึ้นอยู่กับขนาดโตสุด และ โมดูลัสความละเอียดของทราย และตารางที่ 2.8 จะเป็นปริมาณของวัสดุหยาบโดยขึ้นกับค่าความชันเหลวและขนาดโตสุดของหิน

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาปริมาณมวลรวมละเอียด

หลังจากที่หาหน้าหนักต่อปริมาตรของมวลรวมหยาบ ปูนซีเมนต์ น้ำและปริมาณอากาศได้แล้ว ปริมาณทรายก็สามารถคำนวณหาได้เช่นเดียวกับการออกแบบคอนกรีตธรรมดา

ขั้นตอนที่ 8 ปรับแก้ส่วนผสมตามสภาพความชื้นของทรายและหิน

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความชื้นเหลวที่ทดสอบได้จากเครื่องมือต่างๆ

ที่มา : ACI Committee 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) (1992)

ลักษณะของความ ชื้นเหลว	ค่าการยุบตัว ชม.	Vebe วินาที	องค์ประกอบการ บดอัด , ค่าเฉลี่ย	จำนวนรอบ การตกกระทบ
แห้งมาก	-	32-18	-	112-56
แห้ง	-	18-10	0.70	56-28
ค่อนข้างแห้ง	0-3	10-5	0.75	28-14
ปานกลาง	3-8	5-3	0.85	14-7
เปียก	8-13	3-0	0.90	<7
และ	13-18	-	0.95	-

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุด

ที่มา : ACI Committee 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) (1992)

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปื่อยตลอดเวลาหรือมี การเหือกแข็งและการละลายของน้ำ สลับกันบ่อยๆ (คอนกรีตก็กระจ่ายฟองอากาศ)	โครงสร้างสัมผัสน้ำเต็มหรือซัลเฟต
โครงสร้างบางที่มีเหล็กหุ้มบางกว่า 3 ชม.	0.45	0.40
โครงสร้างอื่นๆ	0.50	0.45

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน
ที่มา : ACI Committee 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) (1992)

กำลังอัดประลัยที่ 28 วัน , กก./ตร.ซม.	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ,โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตที่ไม่มีสารกักกระจายฟอง อากาศ	คอนกรีตที่มีสารกักกระจายฟอง อากาศ
500	0.33	-
450	0.38	-
400	0.43	0.34
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

ตารางที่ 2.6 ปริมาณน้ำที่ต้องการ โดยประมาณสำหรับความชื้นเหลวต่างๆ และ ขนาด โดสุคของหิน

ที่มา : ACI Committee 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) (1992)

ความชื้นเหลว					ร้อยละของ น้ำสัมพัทธ์	ปริมาณน้ำต่อปริมาตรคอนกรีตสำหรับแต่ละขนาด โดสุคของหิน (มม.)				
ลักษณะ	ค่าการชุบตัว, ชม.	Vebe, วินาที	จำนวนรอบ การตกกระทบ	องค์ประกอบ การบดอัด		กก./ลบ.ม.				
						10	12.5	20	25	40
คอนกรีตที่ไม่มีสารกักกระจายฟองอากาศ										
แห้งมาก	-	32-18	112-56	-	78	180	170	160	150	140
แห้ง	-	18-10	56-28	0.70	83	185	185	170	160	150
ค่อนข้างแห้ง	0-3	10-5	28-14	0.75	88	200	195	180	170	155
ปานกลาง	3-8	5-3	14-7	0.85	92	205	200	185	180	160
เปียก	8-13	3-0	<7	0.91	100	225	215	200	195	175
และ	13-18	-	-	0.95	106	240	230	210	205	185
ร้อยละปริมาณอากาศกักโดยประมาณในคอนกรีตที่ไม่มีกักอากาศ						3	2.5	2	1.5	1
คอนกรีตที่มีสารกักกระจายฟองอากาศ										
แห้งมาก	-	32-18	112-56	-	78	155	150	140	135	125
แห้ง	-	18-10	56-28	0.70	83	170	160	150	140	135
ค่อนข้างแห้ง	0-3	10-5	28-14	0.75	88	175	170	160	150	140
ปานกลาง	3-8	5-3	14-7	0.85	92	180	175	165	160	145
เปียก	8-13	3-0	<7	0.91	100	200	190	180	175	160
และ	13-18	-	-	0.95	106	215	205	190	185	170
ร้อยละปริมาณอากาศกักโดยเฉลี่ยที่แนะนำ						8	7	6	5	4.5

ตารางที่ 2.7 ปริมาตรของวัสดุหยาบต่อปริมาตรของคอนกรีต

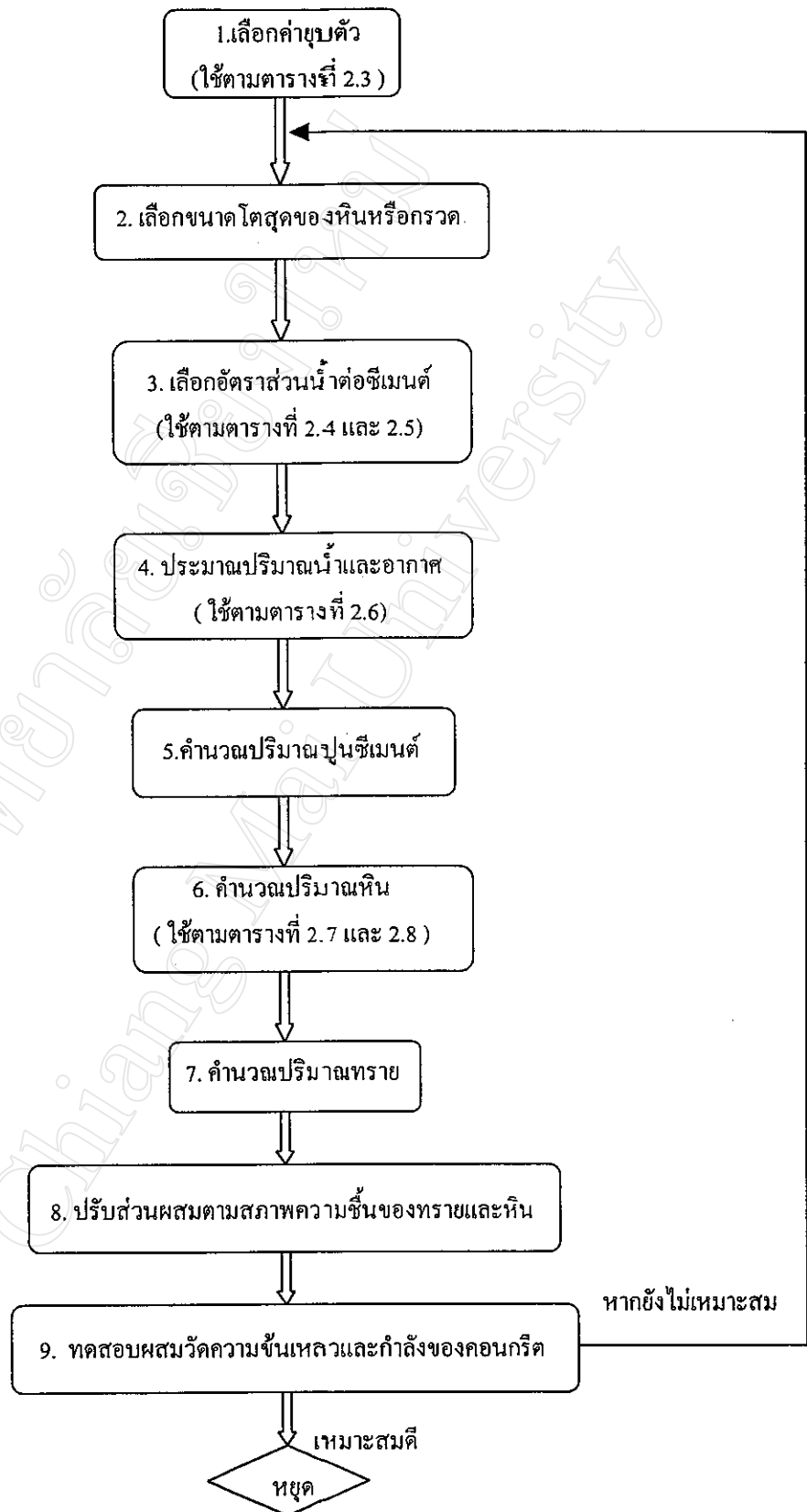
ที่มา : ACI Committee 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) (1992)

ขนาดโตะของหิน , มม.	ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตสำหรับ โมดูลัสความละเอียดของทรายต่าง ๆ			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.76	0.74	0.72	0.70

ตารางที่ 2.8 ปริมาตรของวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตสำหรับความชื้นเหลวต่างๆ

ที่มา : ACI Committee 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) (1992)

ความชื้นเหลว					ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งต่อ ปริมาตรของคอนกรีต				
ลักษณะ	ค่าการ ยุบตัว, ชม.	Vebe, วินาที	จำนวน รอบการ ตก กระทบ	องค์ ประกอบ การบดอัด	ขนาดโตะของหิน (มม.)				
					10	12.5	20	25	40
แห้งมาก	-	32-18	112-56	-	190	170	145	140	130
แห้ง	-	18-10	56-28	0.70	160	145	130	125	125
ค่อนข้างแห้ง	0-3	10-5	28-14	0.75	135	130	115	115	120
ปานกลาง	3-8	5-3	14-7	0.85	108	106	104	106	109
เปียก	8-13	3-0	<7	0.91	100	100	100	100	100
และ	13-18	-	-	0.95	97	98	100	100	100



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีการยวบตัวเป็นศูนย์
ที่มา : ACI Committee 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) (1992)

2.4 การออกแบบคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มตามมาตรฐาน ACI 211.4R-93

ในขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.4R-93 นี้ จะแสดงวิธีการออกแบบสำหรับคอนกรีตกำลังสูงน้ำหนักปกติโดยไม่ใส่สารกักกระจายฟองอากาศ กำลังอัดของคอนกรีตที่ต้องการอยู่ระหว่าง 480 กก/ซม.² ถึง 830 กก/ซม.² ในการผสมจะใส่เถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่ม ซึ่งวิธีการในการออกแบบส่วนผสมจะทำตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือกค่ายวบตัวและกำลังคอนกรีตที่ต้องการ

ค่ายวบตัวของคอนกรีตที่ต้องการ จะแสดงไว้ในตารางที่ 2.9

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดหินใหญ่สุด

ขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตที่ต้องการ แสดงไว้ในตารางที่ 2.10

ขั้นตอนที่ 3 เลือกปริมาณหิน

ปริมาตรหินในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต แสดงไว้ในตารางที่ 2.11 จากนั้นนำปริมาตรของหินที่ได้มาหารน้ำหนักของหินดังนี้

$$W_c = A_{cd} \times V_{cd} \quad (2.3)$$

โดยที่ W_c = น้ำหนักหิน(กก.)

A_{cd} = หน่วยน้ำหนักหินสภาพแห้งกระทุ้งแน่น (กก./ลบ.ม.)

V_{cd} = ปริมาตรหินในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต (ลบ.ม.)

ขั้นตอนที่ 4 ประมาณปริมาณน้ำและอากาศ

ปริมาณน้ำที่ต้องจะเป็นตัวกำหนดค่ายวบตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดหินใหญ่สุด รูปร่างของหินและสัดส่วนขนาดคละ คุณภาพปูนซีเมนต์และประเภทของสารลดน้ำ ตารางที่ 2.12 เป็นการประมาณปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับคอนกรีตกำลังสูงที่มีขนาดหินใหญ่สุดอยู่ระหว่าง 3/8 ถึง 1 นิ้ว ก่อนใส่พวกสารเคมีผสมเพิ่ม และปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ซึ่งปริมาณน้ำที่ได้นี้มีสมมติฐานว่าหินมีรูปร่างดี สะอาด สัดส่วนขนาดคละดีเป็นไปตามข้อกำหนดของ ASTM C33

ค่าปริมาณน้ำที่ต้องการที่ให้ในตารางที่ 2.12 จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ มวลรวมตะเอนคที่มีปริมาณช่องว่างเท่ากับร้อยละ 35 ซึ่งปริมาณช่องว่างในมวลรวมตะเอนคสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V = \left[1 - \frac{A_{\text{sd}}}{B_{\text{sd}}} \right] \times 100 \quad (2.4)$$

โดยที่

V = ปริมาณช่องว่าง (ร้อยละ)

A_{sd} = หน่วยน้ำหนักของมวลรวมตะเอนค (กก./ลบ.ม.)

B_{sd} = ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมตะเอนค (อบแห้ง)

เมื่อปริมาณช่องว่างมวลรวมตะเอนคไม่เท่ากับร้อยละ 35 จะต้องปรับปริมาณน้ำดังสมการต่อไปนี้

$$w' = (V - 35) \times 4.72 \quad (2.5)$$

โดยที่

w' = ปริมาณน้ำที่ต้องปรับ (กก./ลบ.ม.)

จากสมการที่ (2.5) ปริมาณน้ำจะเปลี่ยนไป 4.72 กก./ลบ.ม. เมื่อปริมาณช่องว่างเปลี่ยนไปทุกๆ ร้อยละ 1 จากร้อยละ 35

ขั้นตอนที่ 5 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน ($w/(c+p)$)

ค่า p หมายถึงวัสดุเชื่อมประสาน ประเภทวัสดุปอชโซลาน ซึ่งในที่นี้ได้แก่ เถ้าลอย ค่า $w/(c+p)$ สำหรับกรณีที่ไม่ใส่และไม่ใช่สารลดน้ำปริมาณมาก (HRWR) จะแนะนำไว้ในตารางที่ 2.13

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน

จากขั้นตอนที่ 4 จะได้ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ผสม นำมาหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน ($c+p$ หรือ c ในกรณีที่ไม่มีใส่เถ้าลอย) โดยใช้อัตราส่วน $w/(c+p)$ ในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาปริมาณมวลรวมตะเอนค (กรณีที่ไม่มีใส่เถ้าลอย)

หลังจากที่หาน้ำหนักต่อปริมาตรของมวลรวมหยาบ ปูนซีเมนต์ น้ำและปริมาณอากาศได้แล้ว ปริมาณทรายก็สามารถคำนวณหาได้เช่นเดียวกับการออกแบบคอนกรีตธรรมดา

ขั้นตอนที่ 8 หาส่วนผสมของเถ้าลอยในกรณีที่มีการใช้เถ้าลอย

การใช้เถ้าลอยในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำ อุณหภูมิ และราคาลงได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยไม่คงที่ซึ่งอาจจะมีผลต่อกำลังคอนกรีต ดังนั้นจึงแนะนำว่าในการทดลองผสมควรให้มีปริมาณเถ้าลอยที่แตกต่างกัน อย่างน้อย 2 ค่า เพื่อดูความเหมาะสม

ก. **ประเภทของเถ้าลอย** เนื่องจากส่วนประกอบของเถ้ามีความแตกต่างกัน ปริมาณน้ำที่ลดลง พฤติกรรมด้านกำลังของเถ้าลอย ขึ้นอยู่กับชนิดของเถ้าลอยที่ใช้และแหล่งที่มา ดังนั้นก่อนใช้ควรพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสม

ข. **ปริมาณเถ้าลอย** ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ซีเมนต์ขึ้นอยู่กับประเภทของ เถ้าลอย ขอบเขตของปริมาณเถ้าลอยที่แนะนำให้ใช้แทนที่ซีเมนต์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.14

ค. **น้ำหนักของเถ้าลอย** จากร้อยละการแทนที่ ที่เลือกมา สามารถหาน้ำหนัก ของเถ้าลอยได้โดยนำร้อยละการแทนที่มาคูณกับน้ำหนักของปริมาณวัสดุเชื่อมประสานทั้งหมด (ขั้นตอนที่ 6) ส่วนน้ำหนักที่เหลือก็จะเป็นน้ำหนักซีเมนต์ เมื่อรวมน้ำหนักเถ้าลอยและน้ำหนัก ซีเมนต์ควรจะได้ค่าเท่ากับค่าที่ได้ในขั้นตอนที่ 6

ง. **ปริมาตรของเถ้าลอย** เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความถ่วงจำเพาะของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย ปริมาตรของวัสดุเชื่อมประสานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต จะแปรผันกับปริมาณของเถ้าลอยถึงแม้ว่าน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสานจะคงที่ ดังนั้นในการผสม แต่ละครั้งปริมาตรของวัสดุเชื่อมประสานควรจะทำกับผลรวมของปริมาตรซีเมนต์กับปริมาตรของ เถ้าลอย

จ. **ปริมาณทราย** เมื่อหาปริมาตรของวัสดุเชื่อมประสานในส่วนผสมปริมาตรหิน ปริมาตรน้ำและปริมาตรอากาศได้แล้วก็สามารถคำนวณหาปริมาณทรายได้เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 9 การทดลองผสม

เมื่อหาสัดส่วนผสมตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 8 ได้แล้วก็ทำการทดลอง ผสมเพื่อหาความสามารถเทได้ และกำลัง น้ำหนักของทราย หินและน้ำ ต้องได้รับการปรับค่า ความชื้นให้ถูกต้องก่อน หลังจากการทดลองควรมีการปรับแต่งเพื่อให้ได้จำนวนก้อนตัวอย่างที่มี กำลังตามต้องการ

ขั้นตอนที่ 10 การปรับสัดส่วนผสมใหม่

ถ้าคอนกรีตไม่ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการควรที่จะปรับสัดส่วนผสมใหม่โดยทำ ตามขั้นตอนต่างๆที่กล่าวมาแล้ว

ก. ค่าเริ่มต้น ถ้าค่ายุบตัวเริ่มต้นไม่ได้อยู่ในช่วงที่ต้องการควรจะมีการปรับปริมาณน้ำใหม่ จากนั้นก็ไปปรับน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสานและปริมาณทราย

ข. สารลดน้ำมาก (HRWR) ถ้ามีการใช้สารลดน้ำ ควรจะหาความแตกต่างของปริมาณสารลดน้ำที่มีผลกระทบต่อความสามารถเทได้และกำลังของการผสมคอนกรีต เพราะว่าโดยธรรมชาติของการผสมคอนกรีตกำลังสูง ปริมาณสารที่ใช้จะมากกว่าที่แนะนำโดยโรงงานผลิต ดังนั้นการทดลองในห้องปฏิบัติการควรจะมีการปรับสำหรับงานสนามด้วย

ค. ปริมาณของมวลรวมหยาบ ถ้ามีความต้องการปรับค่ายุบตัว ควรพิจารณาว่าการทำงานยากขึ้นหรือไม่ ถ้ายากอาจจะลดปริมาณมวลรวมหยาบลง และปริมาณทรายก็ควรปรับตามด้วย อย่างไรก็ตามถ้าต้องการน้ำเพิ่มขึ้นก็อาจจะเพิ่มวัสดุเชื่อมประสานขึ้นด้วยเพื่อให้ $w/(c+p)$ เท่าเดิม ในการเพิ่มวัสดุเชื่อมประสานและลดมวลรวมหยาบลงนี้อาจทำให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วลดลงกว่าเดิม

ง. ปริมาณอากาศ หากวัดปริมาณอากาศได้แตกต่างไปจากที่ออกแบบไว้ ควรจะลดปริมาณลงหรือปรับปริมาณทราย

จ. $w/(c+p)$ หากกำลังอัดที่ต้องการสำหรับการใช้ $w/(c+p)$ ไม่เป็นไปตามตารางที่ 2.13 ควรทดสอบโดยการลดค่า $w/(c+p)$ ลง หากกำลังอัดไม่เพิ่มขึ้น ควรพิจารณาวัสดุที่ใช้

ขั้นตอนที่ 11 เลือกสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด

เมื่อมีการปรับสัดส่วนจนได้คุณสมบัติความสามารถเทได้และคุณสมบัติของกำลังตามที่ต้องการแล้ว ก็สามารถทำการหล่อกลุ่มตัวอย่างตามมาตรฐาน ACI 211.1 ได้

ตารางที่ 2.9 ความต้องการค่าการยุบตัว สำหรับใส่และไม่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก (High-range water-reducing admixtures, HRWR)

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1993)

คอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก*	
ค่าการยุบตัวก่อนใส่สารลดน้ำปริมาณมาก	1 - 2 นิ้ว (2.5-5 ซม.)
คอนกรีตที่ไม่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก	
ค่าการยุบตัว	2 - 4 นิ้ว (5-10 ซม.)

* ปรับค่าการยุบตัว ตามที่ต้องการโดยการเติมสารลดน้ำปริมาณมาก

ตารางที่ 2.10 แนะนำขนาดหินใหญ่สุด

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1993)

กำลังอัดที่ต้องการ, (กก/ซม. ²)	ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ, นิ้ว
< 620	$\frac{3}{4}$ - 1
> 620	$\frac{3}{8}$ - $\frac{1}{2}$ *

*เมื่อมีการใช้สารลดน้ำปริมาณมาก, สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วง 620 ถึง 830 กก./ซม.² สามารถใช้ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบได้ถึง 1 นิ้ว

ตารางที่ 2.11 แนะนำปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1993)

ปริมาณที่เหมาะสมของมวลรวมหยาบสำหรับขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบที่ใช้กับทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.5 ถึง 3.2				
ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ, นิ้ว	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
สัดส่วนโดยปริมาตร* ของมวลรวมหยาบสภาพแห้งและอัดแน่น	0.50	0.52	0.55	0.57

*ปริมาตรของมวลรวมหยาบอยู่ในสภาพแห้งและอัดแน่นตามที่อธิบายไว้ใน ASTM C29 สำหรับหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 2.12 ประมาณความต้องการปริมาณน้ำและอากาศของคอนกรีตสดต่อปริมาณช่องว่างทราย

ร้อยละ 35

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1993)

ค่าการยุบตัว, (ซม.)	ปริมาณน้ำ, ลิตร/ลบ.ม.			
	ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ, นิ้ว			
	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
3 - 5	183	174	168	165
5 - 8	189	183	174	171
8 - 10	195	189	180	177
ปริมาณฟอง	3	2.5	2	1.5
อากาศ*	(2.5)**	(2.0)	(1.5)	(1.0)

*ค่านี้จะต้องมีการปรับสำหรับทรายที่มีปริมาณช่องว่างไม่เท่ากับร้อยละ 35 โดยใช้สมการ (2.4)

**สำหรับการผสมที่ใช้สารลดน้ำปริมาณมาก

ตารางที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $w/(c+p)$ กับกำลังอัดประลัย

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1993)

กำลังอัดประลัยในสนาม f_{cr}' *, กก/ซม. ²		$w/(c+p)$			
		ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ, นิ้ว			
		3/8	1/2	3/4	1
สำหรับคอนกรีตที่ไม่ได้สารลดน้ำปริมาณมาก (HRWR)					
480	28-วัน	0.42	0.41	0.40	0.39
	56-วัน	0.46	0.45	0.44	0.43
550	28-วัน	0.35	0.34	0.33	0.33
	56-วัน	0.38	0.37	0.36	0.35
620	28-วัน	0.30	0.29	0.29	0.28
	56-วัน	0.33	0.32	0.31	0.30
690	28-วัน	0.26	0.26	0.25	0.25
	56-วัน	0.29	0.28	0.27	0.26
สำหรับคอนกรีตที่ได้สารลดน้ำปริมาณมาก (HRWR)					
480	28-วัน	0.50	0.48	0.45	0.43
	56-วัน	0.55	0.52	0.48	0.46
550	28-วัน	0.44	0.42	0.40	0.38
	56-วัน	0.48	0.45	0.42	0.40
620	28-วัน	0.38	0.36	0.35	0.34
	56-วัน	0.42	0.39	0.37	0.36
690	28-วัน	0.33	0.32	0.31	0.30
	56-วัน	0.37	0.35	0.33	0.32
760	28-วัน	0.30	0.29	0.27	0.27
	56-วัน	0.33	0.31	0.29	0.29
830	28-วัน	0.27	0.26	0.25	0.25
	56-วัน	0.30	0.28	0.27	0.26

* $f_{cr}' = f_c' + 97$

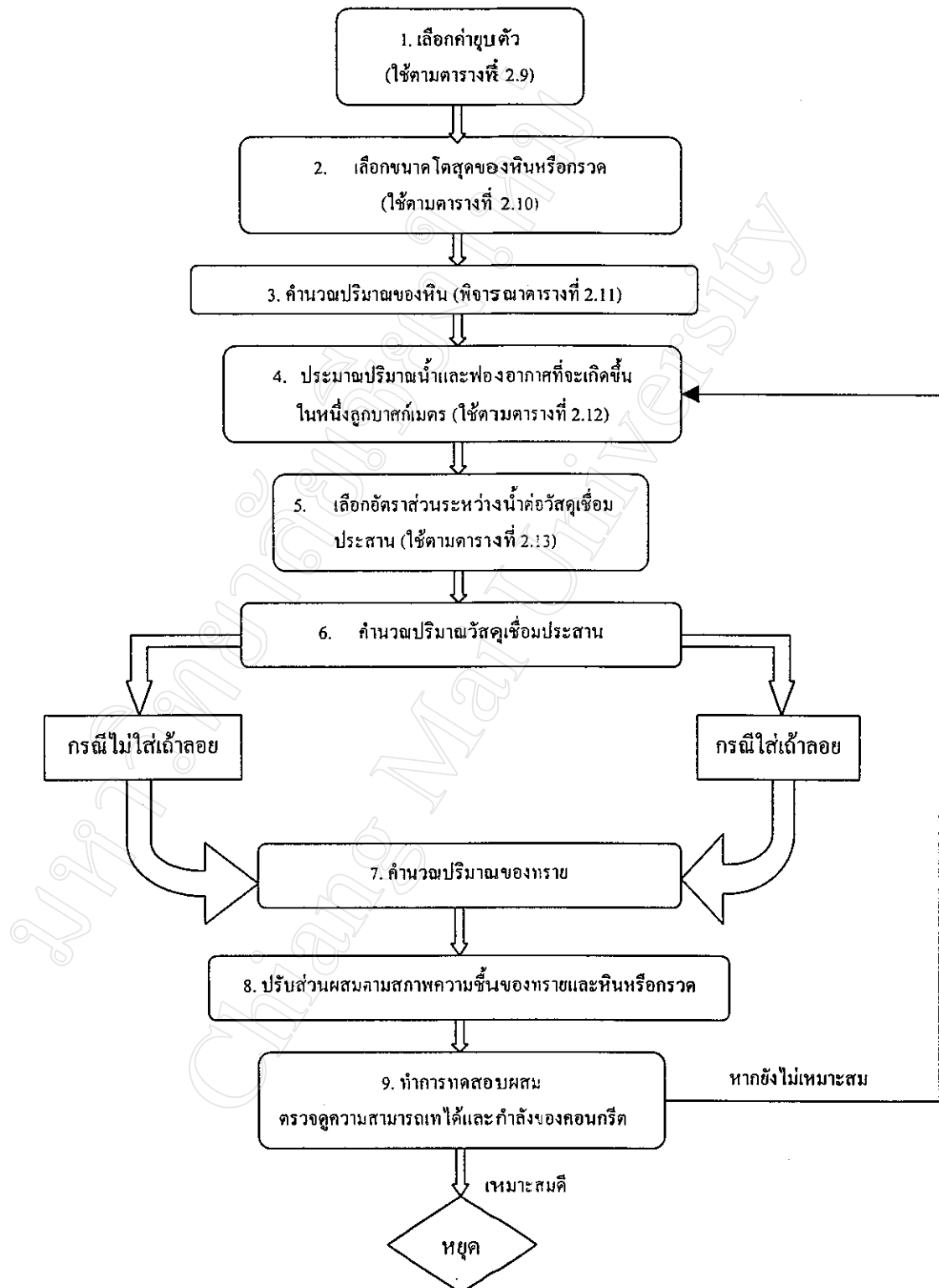
ข้อสังเกต: เปรียบเทียบค่าในตารางที่ 2.13 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับอัตราส่วน w/b ที่เท่ากัน ค่ากำลังอัดในสนามของคอนกรีตที่ได้สารลดน้ำปริมาณมากจะมากกว่าที่ไม่ได้สารลดน้ำปริมาณมาก
2. สำหรับกำลังอัดที่เท่ากันและช่วงเวลาเดียวกัน คอนกรีตที่ได้สารลดน้ำปริมาณมากจะใช้ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้สารลดน้ำปริมาณมาก

ตารางที่ 2.14 แนะนำปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1993)

เถ้าลอย	ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ที่แนะนำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ประเภท F	15 – 25
ประเภท C	20 – 35



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1993)