บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ทั่วไป

ในคอนกรีตกำลังสูงนั้น ส่วนผสมจะประกอบไปด้วยส่วนละเอียดหรือปูนซีเมนต์ที่ใช้ปริมาณมาก ดังนั้นคอนกรีตกำลังสูงที่มีสัดส่วนผสมไม่เหมาะสมก็มักจะเกิดปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น ความสามารถในการเทได้ ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การคืบตัวของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น เพราะฉะนั้นจึงควรที่จะทำการออกแบบส่วนผสมหรือหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง เพื่อที่จะเลือกส่วนผสมและปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสม ที่จะทำให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงเป็นไปตามความต้องการทั้งในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ในราคาที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและเสนอวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้มาตรฐานการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของเอซีไอซึ่งเป็นมาตรฐานหนึ่งที่ได้รับความนิยมใช้กันมากในประเทศไทย มาเป็นแนวทางในการปรับปรุงหาวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำสูงผสมเถ้าลอยโดยไม่ใส่สารลดน้ำที่ใช้ในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสมต่อไป

เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงจะมีส่วนผสมที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ต่ำ จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ซึ่งปูนซีเมนต์นั้นเป็นส่วนผสมที่มีราคาแพงและการใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณมากในส่วนผสมจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตสดที่ได้ไม่เหมาะสม ดังนั้นการนำเอาสารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเหมาะสมมาผสมรวมกับปูนซีเมนต์เพื่อเป็นวัสดุเชื่อมประสานในส่วนผสมของคอนกรีต เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม หรือพวกสารเคมีผสมเพิ่มต่างๆ จะทำให้ได้ส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ลดลง และได้คอนกรีตกำลังสูงที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาในกรณีของการใส่เถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มลงในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมนั้นเราได้อาศัยข้อดีทั้งทางกายภาพและทางเคมีมาใช้ประโยชน์ ในแง่กายภาพเมื่อพิจารณาอนุภาคของเถ้าลอยที่มีลักษณะทรงกลมนั้นจะส่งผลดีต่อความสามารถเทได้ และลดความต้องการน้ำของคอนกรีต อีกทั้งอนุภาคกลมและมีขนาดเล็กนี้ ยังทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดช่องว่างของมวลรวมในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นทึบ ในส่วนประโยชน์ทางเคมีเถ้าลอยจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติพื้นฐานคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น ทั้งในเรื่องความแข็งแรงช่วงปลาย และเพิ่มความทนทาน นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อมอื่นๆ อีก แต่ถ้าการนำเถ้าลอยมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตโดยไม่ได้ศึกษาความเหมาะสมทั้งทางคุณ

สมบัติของถ้าลอย และปริมาณการนำมาใช้ในส่วนผสมแล้ว อาจจะทำให้เกิดข้อเสียบางประการขึ้น เช่น การพัฒนากำลังที่ช้าของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตไม่ได้ตามที่ต้องการ เป็นต้น ซึ่งปัญหาในด้านกำลังเหล่านี้ เกิดเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เป็นปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนนั้นเกิดขึ้นช้า โดยมีสาเหตุทั้งทางตรงและทางอ้อมหลายประการเช่น ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมน้อยเกินไปทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยในช่วงต้น เป็นผลให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับเถ้าลอยน้อยลง ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากเกิน จะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมน้อย เป็นผลให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยตามไปด้วย และเถ้าลอยที่มากเกินนี้จะกลายเป็นวัสดุมวลรวมขนาดเล็กโดยไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และความเร็วของการเข้าทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยอันเป็นผลมาจากปริมาณพื้นผิวของเถ้าลอย ซึ่งจากงานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศพบว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวสูง และอนุภาคที่อยู่ในรูปผลึกมีน้อยกว่าเถ้าลอยที่ไม่คัดขนาดด้วยนั้นจะทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยละเอียดนี้มีการพัฒนากำลังเร็วกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่หยาบกว่า อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยละเอียดเกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูงกว่า และจากปัจจัยเหล่านี้ทำให้งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าลอย ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/(C+P)) ที่มีต่อกำลังของคอนกรีต สำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตด้วยวิธีการของเอซีไอ โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่มีการควบคุมคุณภาพได้ค่อนข้างคงที่

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวกับเถ้าลอย คุณสมบัติเกี่ยวกับคอนกรีตผสมเถ้าลอย และวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของมาตรฐานเอซีไอ

2.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย หรือ เถ้าถ่านหิน เป็นวัสดุละเอียดที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน แล้วถูกพัดออกมาทางปล่องควัน มีสารประกอบทางเคมีคือ ออกไซด์ของซิลิกา และอลูมินา เมื่อสัมผัสกับความชื้นภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้สารที่มีคุณสมบัติเหมือนซีเมนต์ ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลานิก” แล้วเรียกเถ้าลอยว่าเป็น “วัสดุปอซโซลาน” เถ้าลอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชั้นคุณภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้แก่ชั้นคุณภาพ F และชั้นคุณภาพ C โดยแบ่งตามลักษณะองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

- เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินประเภทแอนทราไซท์และบิทูมินัส โดยเถ้าลอยนี้มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก มีปริมาณแคลเซียมน้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้

บางครั้งจะเรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ จึงมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์ต่ำหรือแทบจะไม่มี แต่ยังมีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้ในช่วงต้นจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา

- เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินประเภทลิกไนต์ และซับบิทูมินัส โดยเถ้าลอยนี้มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15 – 23 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง ซึ่งมีคุณสมบัติของซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานในตัวเอง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้จะพัฒนาได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้น

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยโดยใช้องค์ประกอบทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C618-99 (2000)

ที่มา : ASTM C 618-99 (2000)

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพ	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$), น้อยที่สุดร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) , มากที่สุดร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น , มากที่สุดร้อยละ	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Lost on Ignition , LOI), มากที่สุดร้อยละ	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) , มากที่สุดร้อยละ	1.5	1.5

ตารางที่ 2.1 เป็นตารางที่แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแต่ละชั้นคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C618-99(2000) แต่องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าแตกต่างกันในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินที่ใช้ ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา และระบบการดักจับเถ้าถ่าน ดังนั้นเถ้าลอยที่ได้จากแต่ละแหล่งผลิตจะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะ

ที่มา : กลุ่มพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าลอยลิกไนต์ไทย (2545)

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี(% โดยน้ำหนัก)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.9	3.3	0.9	2.1	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	3.9	2.4	0.8	2.3	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	3.1	2.8	1.0	2.6	0.5
2536	43.1	20.2	13.2	13.0	2.6	2.7	1.3	2.4	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	2.8	1.4	0.9	2.0	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.8	2.5	0.7	2.0	0.9
2539	40.6	23.6	13.0	13.0	2.4	2.5	1.2	3.0	0.7
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	2.0	1.2	0.6	3.3	0.8
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.5	2.7	1.1	2.7	0.1
2542	47.2	22.1	9.1	9.4	2.5	3.3	1.7	1.3	0.1
2543	38.9	22.8	13.4	15.2	2.5	2.3	0.8	3.0	0.1
2544	39.9	18.2	13.6	17.2	1.5	2.4	1.3	2.7	0.1

ซึ่งเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2533 – 2544 มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปจะมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากกว่า 70 ปริมาณ CaO จะสูงมากกว่าร้อยละ 10 ปริมาณน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา(LOI)น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จากคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะนี้ไม่สามารถที่จะจำแนกชั้นคุณภาพได้อย่างชัดเจนตามมาตรฐาน ASTM C 618-99(2000)

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C 618-99 (2000)

ที่มา : ASTM C 618-99 (2000)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
ความละเอียด : ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์325 หลังการร่อนแบบเปียก , max %	34	34
ดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 7 วัน น้อยที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม 28 วัน น้อยที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	 75 75	 75 75
ความต้องการน้ำ : มากที่สุดร้อยละเมื่อเทียบกับตัวคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธีAutoclave มากที่สุดร้อยละ	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement) - ความหนาแน่น มากที่สุดจากค่าเฉลี่ยร้อยละ - ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 มากที่สุดจากค่าเฉลี่ยร้อยละ	 5 5	 5 5
ผลคูณระหว่างร้อยละของน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผากับปริมาณร้อยละของที่ค้างบนตะแกรงเบอร์325 (Multiple Factor) : มากที่สุด	255	-
การหดตัว(Drying Shrinkage) ของแท่งมอร์ต้าร์ที่ 28 วัน ที่แตกต่างจากตัวควบคุมมากที่สุดร้อยละ	0.03	0.03

ตารางที่ 2.3 แสดงข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618-99(2000) ซึ่งใช้เป็นข้อกำหนดในการตรวจสอบเถ้าลอยที่จะนำมาใช้งาน

การก่อสร้างงานคอนกรีตในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่แล้วจะนิยมใช้เถ้าลอยจากแม่เมาะ ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์ เนื่องจากมีมาตรฐานในการควบคุมปริมาณสารประกอบเคมีในเถ้าลอยที่คงที่ และให้คุณสมบัติของสารปอซโซลาน

2.2.1 ลักษณะการผสมเถ้าลอยในงานคอนกรีต

การผสมเถ้าลอยในงานคอนกรีตมี 3 ลักษณะด้วยกัน คือ

ก. การแทนที่ โดยการใช้เถ้าลอยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง จากการศึกษาวิจัยพบว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ 0 – 35% โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน(ปูนซีเมนต์ + เถ้าลอย) จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์และส่วนผสมในการทำคอนกรีต

ข. การผสมเพิ่ม โดยการใช้เถ้าลอยผสมเพิ่มในงานคอนกรีต วิธีการนี้มักนิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถในการทำงาน ลดการเยิ้มของคอนกรีต คอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยวิธีนี้มักจะให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะอนุภาคที่กลมและมีขนาดเล็กของเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต และลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และยังช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานของคอนกรีต

ค. การแทนที่และการผสมเพิ่มรวมกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อการปรับปรุงกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้ดีขึ้นกว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และยังต้องการจะประหยัดการใช้ปริมาณซีเมนต์เพื่อลดราคาการผลิตคอนกรีตให้ถูกลง จึงใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง และจากการศึกษาของวราภรณ์ คุณาวนากิจ (2537) พบว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของซีเมนต์แทนที่ซีเมนต์ที่ลดลงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7.2 ที่การยุบตัว 2.5 นิ้ว

การใช้เถ้าลอยในการผสมคอนกรีตจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลง และนอกจากนี้อาจทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยบางอย่างที่ได้จากการนำเถ้าลอยที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็กมาใช้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความสามารถในด้านการลื่นไหล ลดความต้องการน้ำ ลดการสูญเสียน้ำและการแยกชั้นของคอนกรีต เพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตระยะปลาย ลดการหดตัวขณะแห้ง ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เนื้อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้นจึงช่วยเพิ่มความต้านทานซัลเฟตและการแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นต้น

นอกจากการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ในงานคอนกรีตแล้ว เถ้าลอยลิกไนต์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายๆประเภท โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยลิกไนต์จะใช้เป็นมวลละเอียดในงานต่างๆ เช่น ในงานก่อสร้างคันทาง (Embankment) ดินถม (Back Fill) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำเถ้าลอยเป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐ คอนกรีตมวลเบา ใช้เป็นวัสดุดินถมในงานก่อสร้าง ใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพของกากแร่

2.2.2 ปฏิกิริยาเคมีของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$) แคลเซียมเฟอร์ไรท์ไฮเดรต($3CaO.Fe_2O_3.6H_2O$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูน

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ได้สารจำพวกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ได้เช่นเดียวกับปฏิกิริยาที่เกิดจากปูนซีเมนต์กับน้ำแต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีดังนี้

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration of Portland Cement)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบประเภทแคลเซียมซิลิเกต

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) เข้าไปในระหว่างบดปูนซีเมนต์ โดยยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนตหลังจากที่ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำก่อให้เกิดชั้นของเอทตริงไจท์(Ettringite)ดังสมการที่ 2.3 (Mindess and Young , 1981) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต

$$3CaO.Al_2O_3 + 3(CaSO_4.2H_2O) + 26H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \quad \text{(Ettringite)} \quad (2.3)$$

แต่เอทตริงไจท์นี้จะไม่เสถียรภาพซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นโมโนซัลเฟตดังสมการที่ 2.4

$$3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O + 2(3CaO.Al_2O_3) + 4H_2O \longrightarrow 3(3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O) \quad \text{(monosulphoaluminate hydrate)} \quad (2.4)$$

และเมื่อปริมาณซัลเฟตจากยิบซั่มไม่เพียงพอในการเข้าทำปฏิกิริยาแล้วสารประกอบนี้ก็จะเปลี่ยนไปเป็นไตรแคลซียมอลูมิเนตไฮเดรตดังสมการที่ 2.5

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2.5)$$

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์จะเกิดปฏิกิริยาในช่วงต้น โดยเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์จะทำปฏิกิริยากับยิบซั่ม และแคลเซียมไฮดรอกไซด์$Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรท์ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 (Mindess and Young , 1981) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับปริมาณยิบซั่มที่มีในปูนซีเมนต์

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 3(CaSO_4.2H_2O) + 21H_2O \longrightarrow$$
$$3CaO.(Al_2O_3 , Fe_2O_3).3CaSO_4.32H_2O + (Al_2O_3 , Fe_2O_3).3H_2O \qquad (2.6)$$
$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 3CaO.(Al_2O_3 , Fe_2O_3).3CaSO_4.32H_2O + 7H_2O \longrightarrow$$
$$3(3CaO.(Al_2O_3 , Fe_2O_3).CaSO_4.12H_2O) + (Al_2O_3 , Fe_2O_3).3H_2O \qquad (2.7)$$

และเมื่อปริมาณซัลเฟตจากยิบซั่มไม่เพียงพอในการเข้าทำปฏิกิริยาแล้วสารประกอบนี้ก็จะเปลี่ยนเป็น ไตรแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตและไตรแคลเซียมเฟอร์ไรท์ไฮเดรตดังสมการที่ 2.8

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 2Ca(OH)_2 + 10H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O + 3CaO.Fe_2O_3.6H_2O \qquad (2.8)$$

<u>ปฏิกิริยาระหว่าง $Ca(OH)_2$ กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Pozzolanic Reaction)</u>

$$x1\ Ca(OH)_2 + y1\ SiO_2 + z1\ H_2O \longrightarrow x1\ CaO.\ y1\ SiO_2.(x1+z1)\ H_2O$$
$$x2\ Ca(OH)_2 + y2\ Al_2O_3 + z2\ H_2O \longrightarrow x2\ CaO.\ y2\ Al_2O_3.(x2+z2)\ H_2O \qquad (2.9)$$

เมื่อ x1 x2 y1 y2 z1 และ z2 เป็นค่าคงที่

อย่างไรก็ตามกลไกในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะซับซ้อนกว่าที่นำสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง (ชัชวาล เศรษฐบุตร , 2537) เถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก แต่จะหน่วงนานแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย

2.2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ก. คุณสมบัติของคอนกรีตสด

จาก ACI Committee 226 (1996) ได้กำหนดมาตรฐานการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตสดผสมเถ้าลอยดังนี้

ความสามารถทำงานได้ ปริมาตรของเพสที่มีซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะมากกว่าปริมาตรของเพสที่มีเพียงซีเมนต์อย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของเถ้าลอยมีน้อยกว่าซีเมนต์ ซึ่งปริมาตรของเพสที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยปรับปรุงสภาวะพลาสติกและความเชื่อมแน่น (Plasticity and Cohesiveness) ของคอนกรีตให้ดีขึ้น นอกจากนี้ปริมาณ SiO_2 ที่มากกว่า CaO ในเถ้าลอยยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพการกระจายอนุภาคของซีเมนต์และเถ้าลอยในเพสที่มีอัลคาไลสูงได้อีกด้วย

เถ้าลอยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของเพส เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีรูปร่างกลมจะช่วยในการไหลลื่นดีขึ้น ซึ่งทำให้ความต้องการน้ำในการผสมคอนกรีตลดลง นอกจากนี้เถ้าลอยในชั้นคุณภาพ F ยังช่วยลดอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอยในสภาวะอากาศร้อนได้อีกด้วย

การเยิ้ม การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตจะช่วยลดการเยิ้มโดยอนุภาคของเถ้าลอยซึ่งมีความละเอียดจะเข้าไปทดแทนช่องว่างที่ขาดหายไปของมวลรวมละเอียดและช่วยกั้นช่องเพื่อไม่ให้เกิดการเยิ้มของน้ำ

ความสามารถในการปั๊ม เถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตจะช่วยให้ความสามารถในการปั๊มดีขึ้น เนื่องจากรูปร่างของเถ้าลอยมีลักษณะกลมทำให้ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมด้วยกันและระหว่างคอนกรีตกับท่อปั๊ม

เวลาของการก่อตัว การใช้เถ้าลอยอาจทำให้คอนกรีตมีการก่อตัวช้าลง โดยเฉพาะเถ้าลอยในชั้นคุณภาพ F จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นโดยที่เถ้าลอยจะหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเริ่มแรกของ C_3S ในขณะที่เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C อาจจะเพิ่ม ลด หรือไม่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวเลยก็ได้

ข. คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

จาก ACI Committee 226 (1996) ได้กำหนดมาตรฐานการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วดังนี้

กำลังอัดและอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลัง คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยโดยการแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม สามารถเพิ่มกำลังอัดได้เมื่ออายุคอนกรีตมากกว่า 28 วัน เมื่อเทียบกับ

คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยถ้าเป็นเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังจะมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และให้กำลังอัดที่สูงกว่าเมื่ออายุมากกว่า 28 วัน สำหรับคอนกรีตชั้นคุณภาพ C จะให้กำลังอัดในช่วงแรกสูงกว่าเถ้าลอยในชั้นคุณภาพ F และอาจจะสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

โมดูลัสความยืดหยุ่น จากการศึกษาของสถาบัน Tennessee Valley Authority พบว่าเถ้าลอยมีผลต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตน้อยมากเมื่อเทียบกับผลด้านกำลัง โดยคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลของการศึกษาสรุปได้ว่า ซีเมนต์และมวลรวมมีผลต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตมากกว่าเถ้าลอย

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

แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตที่มีต่อเหล็ก แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตที่มีต่อเหล็กจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเหล็กสัมผัสกับคอนกรีต ระยะฝังลึก และความหนาแน่นของคอนกรีต การใช้เถ้าลอยจะช่วยเพิ่มปริมาตรของเพสต์ และช่วยลดการเยิ้ม ดังนั้นโอกาสที่เหล็กจะสัมผัสกับคอนกรีตจึงมีมากขึ้น ผลก็คือเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตยึดเหนี่ยวกับเหล็กได้ดียิ่งขึ้น

การต้านทานการกระแทก การต้านทานการกระแทกของคอนกรีตขึ้นอยู่กำลังอัดของปูนทรายและความแข็งของหินเป็นหลัก แต่การใช้เถ้าลอยจะมีผลช่วยให้การต้านทานการกระแทกของคอนกรีตดีขึ้นเพียงเพราะช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีตดีขึ้นนั้นเอง

การต้านทานการสึกกร่อน กำลังอัด การบ่ม การตกแต่ง และคุณสมบัติของมวลรวม เป็นปัจจัยหลักในการควบคุมการต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีต ดังนั้นที่กำลังอัดเท่ากันและคอนกรีตบ่มและตกแต่งเหมือนกัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอย จะต้านทานการสึกกร่อนได้เท่ากัน

อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในคอนกรีต การใช้เถ้าลอยผสมคอนกรีตจะช่วยให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตลดลง เนื่องจากความร้อนในคอนกรีตส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์และน้ำ การใส่เถ้าลอยจะช่วยให้ลดปริมาณซีเมนต์ลงและคุณสมบัติของเถ้าลอยเองยังช่วยหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้ปฏิริยาไฮเดรชั่นลดลง ดังนั้นความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงลดลงด้วย

ปริมาณฟองอากาศ การใส่เถ้าลอยในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีฟองอากาศลดลง เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็กจะแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างช่องว่างแทนที่อากาศทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และช่วยให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่อาจจะมีปัญหากับคอนกรีตที่ต้องการปริมาณฟองอากาศ อย่างเช่น คอนกรีตที่ต้องการต้านทานการแข็งตัวและการละลายของน้ำ (Freezing and Thawing) ในพื้นที่เขตหนาว นอกจากนี้ ปริมาณคาร์บอน ปริมาณการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ ค่าความละเอียดและสารอินทรีย์ในเถ้าลอย ยังมีผลต่อสารกักกระจายฟองอากาศ ทำให้การควบคุมปริมาณฟองอากาศทำได้ยาก

การป้องกันการซึมผ่านและการกัดกร่อน ความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีตขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน ปริมาณน้ำ การกระจายขนาดคละของมวลรวม การยุบตัว และการบ่ม แต่การใส่เถ้าลอยในส่วนผสมนั้นได้อาศัยคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าลอยซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำและอาจจะแพร่ออกมาจากเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วตามช่องการซึมผ่านของน้ำนั้น ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งจะช่วยให้ลดอันตรายเนื่องจากการแพร่ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเป็นผลให้การซึมผ่านลดลงด้วย ซึ่งเมื่อการซึมผ่านลดลงจะช่วยให้ลดอัตราการไหลผ่านของน้ำ สารเคมีที่กัดกร่อน และออกซิเจนลงด้วย

ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา การใช้เถ้าลอยที่เพียงพอสามารถลดปริมาณการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมวลรวมกับอัลคาไล และลดหรือกำจัดอันตรายเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีตเพราะผลึกซิลิกาในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับอัลคาไลไฮดรอกไซด์ในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณอัลคาไลในคอนกรีต

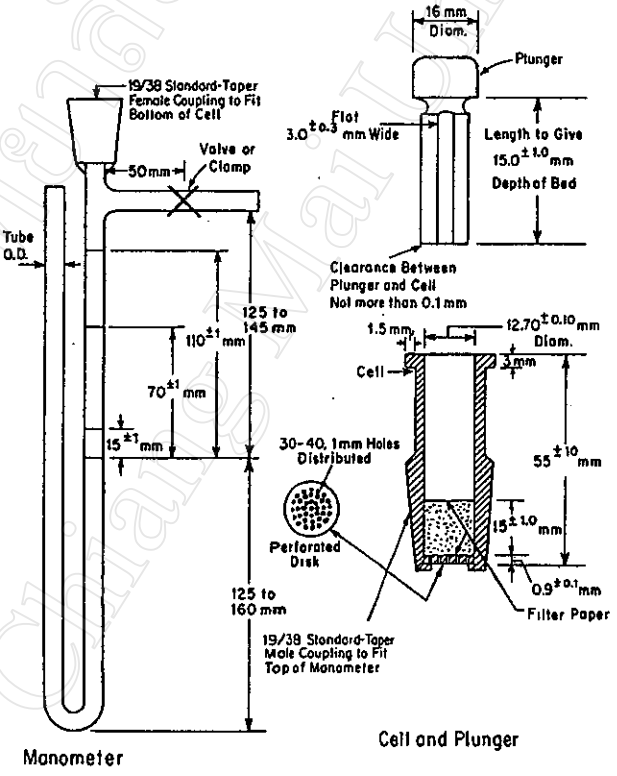
การต้านทานซัลเฟต การต้านทานซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยนั้นคาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งจะเข้าไปแทนที่โพรงอากาศในซีเมนต์เพสต์ ลดความสามารถในการซึมผ่านและการไหล

ผ่านของสารละลายซัลเฟต ผลของเถ้าลอยที่มีต่อการต้านทานซัลเฟตนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณ และคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยและซีเมนต์ที่ใช้

การหดตัวคลายน้ำ การหดตัวคลายน้ำจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย แต่จะไม่พบความแตกต่างของการหดตัวตัวคลายน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณไม่เกินร้อยละ 20 กับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

2.3 การทดสอบหาความละเอียด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทดสอบหาความละเอียดของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ โดยเครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตี (Air Permeability Apparatus) แบบเบลนตามมาตรฐาน ASTM C204–96a (2000)ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตีแบบเบลนซึ่งใช้ทดสอบหาความละเอียดของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์

การทดสอบหาความละเอียดโดยเครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตีแบบเบลน หรือการหาค่า Blain Fineness เป็นการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งหมายถึงผิวนอกทั้งหมดของอนุภาคตัวอย่างทดสอบต่อหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ คิดเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม ทำการทดสอบโดยการดูดอากาศจำนวนจำกัดจำนวนหนึ่งให้ไหลผ่านชั้นตัวอย่างทดสอบที่มีความพรุนค่าหนึ่ง (สำหรับปูนซีเมนต์จะให้มีความพรุนเท่ากับ 0.5) ที่บรรจุอยู่ในแอร์เพอร์มีอะบิลิตีเซล ซึ่งสวมอยู่ที่ปลายบนของมานอมิเตอร์ทำจากแก้วใสและมีของเหลวที่มีความหนาแน่นและความหนืดต่ำบรรจุอยู่ภายใน

ในการดูดอากาศให้ไหลผ่านชั้นตัวตัวอย่างทดสอบทำโดยการสูบอากาศออกจากก้านมานอมิเตอร์ช้าๆ จนกระทั่งของเหลวในมานอมิเตอร์มีระดับสูงถึงขีดหมายเส้นบนสุด แล้วปิดลิ้นปิดเปิดที่ติดอยู่กับมานอมิเตอร์ให้แน่น ในขณะเดียวกันของเหลวในมานอมิเตอร์ก็จะค่อยๆลดระดับลง จากนั้นให้เริ่มจับเวลาทันทีที่ระดับก้นเมนิสกัส (meniscus) ของของเหลวลดลงมาถึงขีดหมายเส้นที่ 2 (นับจากเส้นบนสุด) และให้หยุดจับเวลาทันทีที่ระดับก้นเมนิสกัสของของเหลวลดลงมาถึงขีดหมายเส้นที่ 3 แล้วทำการจดช่วงเวลาดังกล่าวไว้ละเอียดเป็นวินาที และบันทึกอุณหภูมิขณะทดสอบไว้เป็นองศาเซลเซียส ในการคำนวณหาค่าความละเอียดนั้นให้นำเอาค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์มาตรฐานเบอร์ 114 ที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือ ระยะเวลาที่ของเหลวในมานอมิเตอร์ลดลง ค่าความพรุนของชั้นตัวอย่างทดสอบ ค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างทดสอบ และอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดสอบทั้งในกรณีที่ทดสอบด้วยปูนซีเมนต์มาตรฐานและตัวอย่างที่ต้องการหาค่าความละเอียด มาแทนลงในสูตรหาค่าความละเอียดของมาตรฐาน ASTM C204-96a(2000) ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขของสูตรนั้นๆ

2.4 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยตามมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกา (ACI 211.4R-93)

การทำคอนกรีตกำลังสูงที่มีประสิทธิภาพนั้นจะต้องทำการคัดเลือกวัสดุ และควบคุมการผสมอย่างดี ดังนั้นในการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยตามมาตรฐานคอนกรีตอเมริกา จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จะต้องเลือกประเภทและแหล่งของซีเมนต์ที่เหมาะสม ตามมาตรฐาน ASTM C917 และทดสอบหาคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C311

ข. เถ้าลอย

เถ้าลอยที่ใช้จะต้องมีค่า LOI ไม่เกิน 3 % มีความละเอียดสูง และต้องมีความสม่ำเสมอ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 และทดสอบหาคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C311

ค. น้ำที่ใช้ผสม

น้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C94 ถ้าใช้น้ำประปาก็ไม่จำเป็นต้อง ทดสอบ

ง. มวลรวม

หินจะต้องเลือกที่มีความแข็งเพียงพอ ไม่มีรอยแตกร้าว สะอาดและพื้นผิวต้องไม่มีอะไรปกคลุม ส่วนทรายจะต้องมีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 3.2 และสะอาด ซึ่งมวลรวมจะต้องทำการหาคุณสมบัติโดยทดสอบตามมาตรฐานดังนี้

- ขนาดคละ ควรมีส่วนคละตามมาตรฐาน ASTM C33 และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136
- ความถ่วงจำเพาะ

  ทราย ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128

  หิน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127
- ความชื้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C70 และ ASTM C566
- ความละเอียดของทราย คำนวณตามมาตรฐาน ASTM C125
- หน่วยน้ำหนักของมวลรวม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C29

จ. สารเคมีผสมเพิ่ม

เป็นไปตามมาตรฐาน ACI 212.3R และ ASTM C494

ในขั้นตอนการออกแบบคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา ACI 211.4R-93 นี้ จะแสดงวิธีการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงน้ำหนักปกติโดยไม่ใส่สารกักกระจายฟองอากาศ โดยมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 420 ถึง 840 กก./ซม.^{2} ในการผสมจะใส่เถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่ม ซึ่งวิธีการออกแบบส่วนผสมนี้จะประกอบด้วยขั้นตอนที่จะแสดงต่อไป เพื่อให้ได้คอนกรีตที่คุณสมบัติในขณะที่ข้นเหลวและแข็งตัว เป็นไปตามความต้องการ

ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 1 เลือกค่ายุบตัวและกำลังที่ต้องการ

การเลือกค่ายุบตัวจะแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการยุบตัวที่แนะนำ สำหรับคอนกรีตที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก (High-range water-reducing admixtures , HRWR)

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1996)

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

*ปรับค่าการยุบตัวตามต้องการโดยการเติมสารลดน้ำลดน้ำปริมาณมาก

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดใหญ่สุดของมวลรวม

ขนาดมวลรวมหยาบใหญ่สุดจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดที่ต้องการ ซึ่งขนาดมวลรวมหยาบใหญ่สุดที่แนะนำแสดงไว้ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงขนาดมวลรวมใหญ่สุดที่แนะนำ

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1996)

กำลังอัดที่ต้องการ , กก./ซม.^{2}	ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ , นิ้ว
< 630	¾ - 1
> 630	3/8 - ½ *

*เมื่อมีการใช้สารลดน้ำปริมาณมาก สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วง 630 ถึง 840 ก.ก./ซม.^{2} สามารถใช้ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบได้ถึง 1 นิ้ว

ขั้นตอนที่ 3 เลือกปริมาณมวลรวมหยาบ

ปริมาตรหินในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 2.6 จากนั้นนำปริมาตรของหินที่ได้มาหาน้ำหนักของหินดังนี้

$$W_c = A_{cd} \times V_{cd} \qquad (2.10)$$

โดยที่ W_c = น้ำหนักหิน(กก.)

A_{cd} = หน่วยน้ำหนักหินในสภาพแห้งกระทุ้งแน่น (กก./ม.^{3})

V_{cd} = ปริมาตรหินในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต (ม.^{3})

ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตที่แนะนำ

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1996)

ปริมาณที่เหมาะสมของมวลรวมหยาบสำหรับขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้กับทรายที่มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.5 ถึง 3.2				
ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม , นิ้ว	3/8	1/2	3/4	1
สัดส่วนโดยปริมาตร * ของมวลรวมหยาบสภาพแห้งและอัดแน่น	0.65	0.68	0.72	0.75

*ปริมาตรของมวลรวมอยู่ในสภาพแห้งและอัดแน่นตามที่ได้อธิบายไว้ใน ASTM C29 สำหรับหน่วยน้ำหนักของมวลรวม

ขั้นตอนที่ 4 ประมาณปริมาณน้ำที่ใช้ผสมและอากาศ

ปริมาณน้ำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตที่ต้องการสำหรับค่ายุบตัวหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับขนาดโตสุด รูปร่าง และการกระจายขนาดคละของมวลรวม คุณภาพของซีเมนต์ และชนิดของสารลดน้ำที่ใช้ ตารางที่ 2.7 แสดงการประมาณปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับคอนกรีตกำลังสูงที่มีขนาดหินใหญ่สุดอยู่ระหว่าง 3/8 ถึง 1 นิ้ว ก่อนใส่สารเคมีผสมเพิ่มและปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ซึ่งปริมาณน้ำที่แนะนำนี้เป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสำหรับหินรูปร่างดี สะอาด การกระจายขนาดคละดีเป็นไปตามข้อกำหนดของ ASTM C33

ค่าปริมาณน้ำที่แนะนำในตารางที่ 2.7 นั้นได้แนะนำไว้สำหรับเมื่อใช้มวลรวมละเอียดที่มีปริมาณช่องว่างเท่ากับ 35% ซึ่งปริมาณช่องว่างในมวลรวมละเอียดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V = [1 - \frac{A_{fd}}{B_{fd}}] \times 100 \qquad (2.11)$$

โดยที่ V = ปริมาณช่องว่าง (%)

A_{fd} = หน่วยน้ำหนักอบแห้งของมวลรวมละเอียด (กก./ม.^{3})

B_{fd} = ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด (อบแห้ง)

เมื่อปริมาณช่องว่างของมวลรวมละเอียดไม่เท่ากับ 35% จะต้องปรับปริมาณน้ำดังสมการต่อไปนี้

$$w' = (V - 35) \times 4.75 \qquad (2.12)$$

โดยที่ w = ปริมาณน้ำที่ต้องปรับ (กก./ม.^{3})

จากสมการที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณช่องว่างเปลี่ยนไปทุก 1% จาก 35% ปริมาณน้ำจะเปลี่ยนไป 4.75 (กก./ม.^{3})

ตารางที่ 2.7 แสดงการประมาณความต้องการปริมาณน้ำและอากาศของคอนกรีตสดเมื่อใช้ทรายที่มีช่องว่างร้อยละ 35

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1996)

ค่าการยุบตัว , ซม.	ปริมาณน้ำ , กก./ ม.^{3}			
	ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ , นิ้ว			
	3/8	1/2	3/4	1
3 - 5	184	175	169	166
5 - 8	190	184	175	172
8 - 10	196	190	180	178
ปริมาณฟอง อากาศ*	3 (2.5)**	2.5 (2.0)	2 (1.5)	1.5 (1.0)

*ค่านี้จะต้องปรับเมื่อใช้ทรายที่มีปริมาณช่องว่างไม่เท่ากับร้อยละ 35 โดยใช้สมการ (11)

**สำหรับการผสมที่ใช้สารลดน้ำปริมาณมาก

ขั้นตอนที่ 5 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/(C+P))

ในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงนอกจากจะใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานแล้ว อาจจะใช้วัสดุประสานชนิดอื่นเช่น เถ้าลอย และอัตราส่วน W/(C+P) สามารถหาได้จากการหารน้ำหนักของน้ำที่ใช้ผสมด้วยน้ำหนักรวมของปูนซีเมนต์และวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งค่า P หมายถึงวัสดุเชื่อมประสานประเภทสารปอซโซลาน โดยในที่นี้ใช้เถ้าลอย ค่า(W/(C+P)) ได้แนะนำดังตารางที่ 2.8 สำหรับทั้งกรณีที่ไม่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก (HRWR) และกรณีที่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก(HRWR) ซึ่งแสดงเป็นความสัมพันธ์กับขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ และกำลังอัดที่ 28 วัน และ 56 วัน

ตารางที่ 2.8 แสดงอัตราส่วน W/(C+P) ที่แนะนำสำหรับกำลังอัดประลัยต่างๆ

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1996)

กำลังอัดประลัยในสนาม f_{cr}' *,กก./ซม.^{2}		W/(C+P)			
		ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ , นิ้ว			
		3/8	1/2	3/4	1
สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก (HRWR)					
490	28-วัน	0.42	0.41	0.40	0.39
	56-วัน	0.46	0.45	0.44	0.43
560	28-วัน	0.35	0.34	0.33	0.33
	56-วัน	0.38	0.37	0.36	0.35
630	28-วัน	0.30	0.29	0.29	0.28
	56-วัน	0.33	0.32	0.31	0.30
700	28-วัน	0.26	0.26	0.25	0.25
	56-วัน	0.29	0.28	0.27	0.26
สำหรับคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก (HRWR)					
490	28-วัน	0.50	0.48	0.45	0.43
	56-วัน	0.55	0.52	0.48	0.46
560	28-วัน	0.44	0.42	0.40	0.38
	56-วัน	0.48	0.45	0.42	0.40
630	28-วัน	0.38	0.36	0.35	0.34
	56-วัน	0.42	0.39	0.37	0.36
700	28-วัน	0.33	0.32	0.31	0.30
	56-วัน	0.37	0.35	0.33	0.32
770	28-วัน	0.30	0.29	0.27	0.27
	56-วัน	0.33	0.31	0.29	0.29
840	28-วัน	0.27	0.26	0.25	0.25
	56-วัน	0.30	0.28	0.27	0.26

*$f_{cr}' = f_c' + 98$

ข้อสังเกต : เปรียบเทียบค่าในตารางที่ 2.8 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน ค่ากำลังอัดในสนามของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำปริมาณมากจะมากกว่าที่ไม่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก
2. สำหรับกำลังอัดที่เท่ากันและช่วงเวลาเดียวกัน คอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำปริมาณมากจะใช้ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน

นำปริมาณน้ำที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 หารด้วยค่าอัตราส่วน W/(C+P) จากขั้นตอนที่ 5 ก็จะได้น้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาสัดส่วนผสมพื้นฐานในกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

ในการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมนั้น ผู้กำหนดสัดส่วนผสมจะต้องเตรียมส่วนผสมหลายๆ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอยผสมอยู่ในปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งโดยปกติจะต้องมีส่วนผสมหนึ่งที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวเป็นส่วนผสมพื้นฐาน โดยหาส่วนผสมพื้นฐานได้ดังนี้

1. ปริมาณปูนซีเมนต์ น้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้ในสัดส่วนผสมพื้นฐานนี้เท่ากับน้ำหนักวัสดุประสานที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 6

2. ปริมาณทราย หลังจากที่คำนวณหาน้ำหนักของมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต ปริมาณวัสดุประสานและปริมาณน้ำและฟองอากาศแล้ว ก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณทรายได้จากวิธีปริมาตรสัมบูรณ์ ดังนี้

ปริมาตรของทราย = ปริมาตรของคอนกรีต – ปริมาตรของส่วนผสม(ยกเว้นทราย)

น้ำหนักของทราย = ปริมาตรของทราย × ถ.พ. ของทราย × หน่วยน้ำหนักของน้ำ

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาสัดส่วนผสมของกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

การใช้เถ้าลอยในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงจะช่วยลดความต้องการน้ำ อุณหภูมิ และราคาของคอนกรีตลงได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ไม่คงที่ ซึ่งอาจจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ดังนั้นจึงแนะนำว่าในการทดลองผสมควรให้มีปริมาณเถ้าลอยที่แตกต่างกันอย่างน้อยที่สุด 2 ค่า เพื่อเปรียบเทียบหาความเหมาะสม และจะต้องพิจารณาตามขั้นตอนต่อไปนี้ในการทดลองผสมแต่ละครั้ง

ก. <u>ประเภทของเถ้าลอย</u> เนื่องจากส่วนประกอบทางเคมี ความสามารถในการลดน้ำ และกำลังที่ได้ ของเถ้าลอยที่แตกต่างกันในแต่ละชนิด และแหล่งที่มา ดังนั้นก่อนนำเถ้าลอยมาใช้ควรพิจารณาให้เหมาะสม

ข. ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์นั้นขึ้นอยู่กับประเภทของเถ้าลอย ขอบเขตของปริมาณเถ้าลอยที่แนะนำให้ใช้แทนที่ซีเมนต์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.9

ค. น้ำหนักของเถ้าลอย จากร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยที่ถูกเลือกมา สามารถหาน้ำหนักของเถ้าลอยได้โดยนำร้อยละของการแทนที่มาคูณกับน้ำหนักของปริมาณวัสดุเชื่อมประสานทั้งหมด (ขั้นตอนที่ 6) ส่วนน้ำหนักที่เหลือก็จะเป็นน้ำหนักซีเมนต์ เมื่อรวมน้ำหนักเถ้าลอยและน้ำหนักซีเมนต์ควรจะได้ค่าเท่ากับค่าที่ได้ในขั้นตอนที่ 6

ง. ปริมาตรของเถ้าลอย เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย ปริมาตรของวัสดุเชื่อมประสานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตจะแปรผันกับปริมาณของเถ้าลอย ถึงแม้ว่าน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสานจะคงที่ ดังนั้นในการผสมแต่ละครั้ง ปริมาตรของวัสดุเชื่อมประสานควรจะเท่ากับผลรวมของปริมาตรซีเมนต์กับปริมาตรของเถ้าลอย

จ. ปริมาณทราย เมื่อหาปริมาตรของวัสดุเชื่อมประสาน ปริมาตรหิน ปริมาตรน้ำและปริมาตรอากาศ ต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตได้แล้ว ก็สามารถคำนวณหาปริมาณทรายได้เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 7

จากขั้นตอนข้างต้น ปริมาตรรวมของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยรวมกับทรายต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตจะต้องคงที่ ซึ่งอาจจะทำให้ต้องทำการปรับสัดส่วนผสม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้องการน้ำและผลกระทบอื่นๆ จากเถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติคอนกรีต โดยค่าที่จะปรับเหล่านี้จะสังเกตได้ตอนทำการทดลองผสม ซึ่งจะอธิบายในขั้นตอนที่ 10

ตารางที่ 2.9 แสดงปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่แนะนำ

ที่มา : ACI Committee 211.4R-93 (1996)

เถ้าลอย	ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่แนะนำ ร้อยละโดยน้ำหนัก
ชั้นคุณภาพ F	15 – 25
ชั้นคุณภาพ C	20 - 35

ขั้นตอนที่ 9 ทำการผสมตามสัดส่วนผสมต่างๆ ที่กำหนดไว้

เมื่อหาสัดส่วนผสมตามขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 8 ได้แล้วก็ทำการผสมสัดส่วนผสมต่างๆ เพื่อหาความสามารถในการเทได้ และกำลังของคอนกรีตของแต่ละส่วนผสม

น้ำหนักของทราย หินและน้ำ จะต้องทำการปรับค่าให้ถูกต้องตามสภาพความชื้นของมวลรวมที่นำมาใช้ ปริมาณคอนกรีตในแต่ละครั้งที่ทำการผสมควรจะมีปริมาณที่เพียงพอในการหล่อตัวอย่างตามจำนวน สำหรับทำการทดสอบกำลังคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 10 การปรับแต่งสัดส่วนผสมใหม่

ถ้าคอนกรีตที่ทำการผสมในครั้งแรกยังไม่ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ส่วนผสมเดิมควรจะปรับใหม่ตามขั้นตอนต่อไปนี้ เพื่อให้ได้ความสามารถในการใช้งานตามต้องการ

ก. <u>ค่าการยุบตัวเริ่มต้น</u> ถ้าค่ายุบตัวเริ่มต้นไม่ได้อยู่ในช่วงที่ต้องการ ควรจะมีการปรับปริมาณน้ำใหม่ จากนั้นก็ทำการปรับน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสานให้สอดคล้องกับค่า W/(C+P) และทำการปรับปริมาณทราย

ข. <u>ปริมาณสารลดน้ำปริมาณมาก (HRWR)</u> ถ้ามีการใช้สารลดน้ำควรทำการสังเกตุหาความแตกต่างของปริมาณสารลดน้ำที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการเทได้ เพราะโดยทั่วไปแล้วการผสมคอนกรีตกำลังสูง ปริมาณสารที่ใช้จะมากกว่าที่แนะนำโดยโรงงานที่ผลิต ดังนั้นปริมาณที่ได้จากการทดลองผสมในห้องปฏิบัติการควรจะมีการปรับสำหรับงานสนามด้วย

ค. <u>ปริมาณมวลหยาบ</u> คอนกรีตที่ทำการปรับค่ายุบตัวแล้ว ควรพิจารณาด้วยว่าการทำงานยากหรือไม่ ถ้ายากอาจจะทำการลดปริมาณมวลหยาบลง และปริมาณทรายก็จะต้องทำการปรับตามด้วย อย่างไรก็ตามการทำเช่นนี้อาจจะเพิ่มความต้องการน้ำในส่วนผสมซึ่งจะเป็นผลให้ต้องปรับปริมาณวัสดุเชื่อมประสานด้วย เพื่อให้ค่า W/(C+P) คงที่ ในการลดปริมาณมวลรวมหยาบลงอาจส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วลดลง

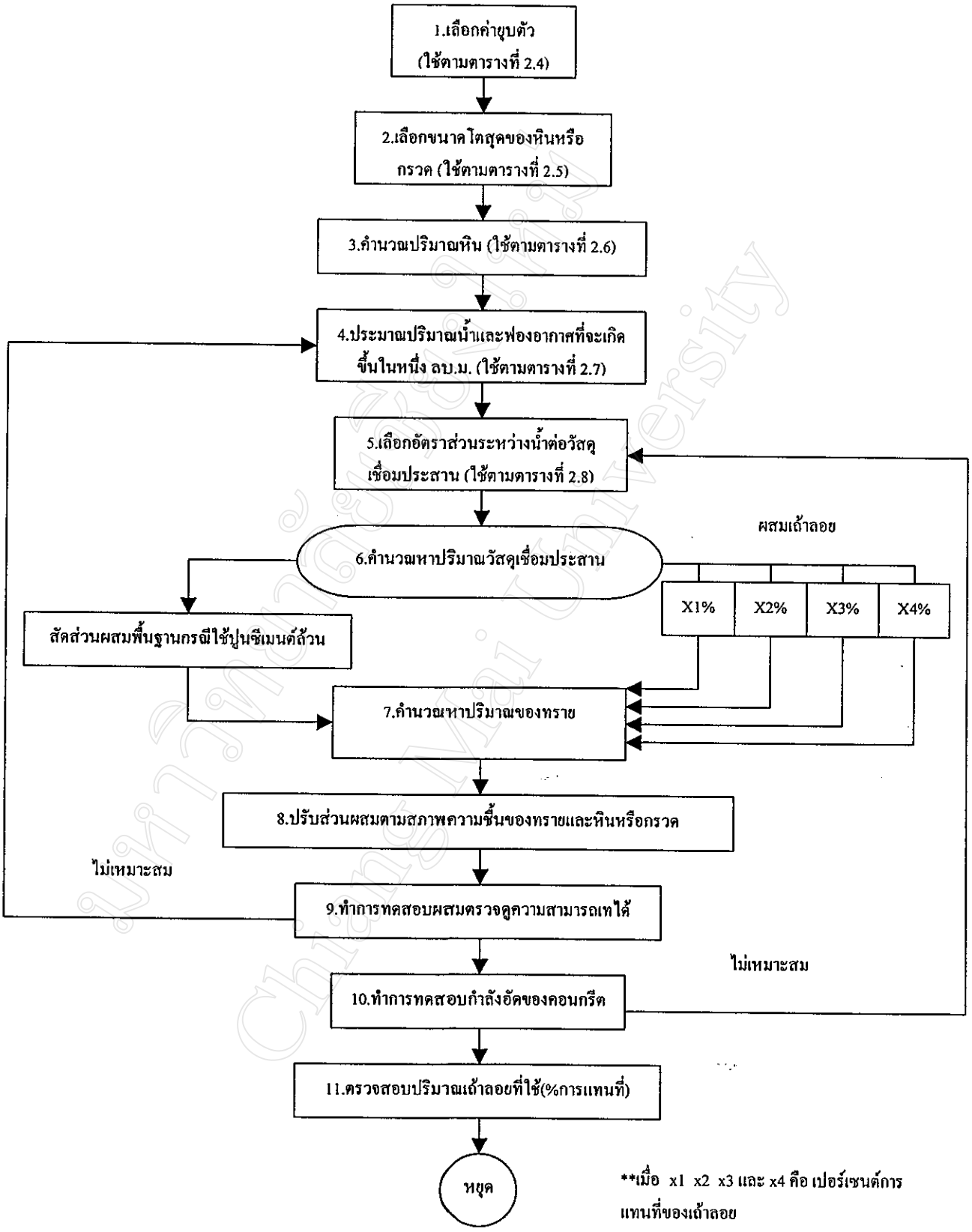
ง. <u>ปริมาณอากาศ</u> ถ้าปริมาณอากาศที่วัดได้ต่างไปจากที่กำหนดออกแบบไว้ ควรจะปรับปริมาณอากาศที่ออกแบบไว้ หรือใช้การปรับปริมาณทรายแทน

จ. <u>W/(C+P)</u> ถ้ากำลังอัดที่ต้องการสำหรับการใช้ W/(C+P) ไม่เป็นตามที่แนะนำไว้ในตารางที่ 2.8 ควรทำการทดลองผสมใหม่โดยใช้ค่า W/(C+P) ที่ต่ำลง และถ้ากำลังอัดยังไม่เพิ่มขึ้นอีกควรพิจารณาวัสดุที่ใช้

ขั้นตอนที่ 11 เลือกสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด

เมื่อทำการปรับส่วนผสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติความสามารถในการเทและคุณสมบัติของกำลังตามที่ต้องการแล้ว ก็ทำการหล่อกลุ่มตัวอย่างตามมาตรฐาน ACI 211.1 เพื่อทำการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบด้านกำลังที่ได้นั้นควรจะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งทางด้านกำลังที่ต้องการและราคา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University



รูปที่ 2.2. แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยตามมาตรฐานคอนกรีตอเมริกา (ACI 211.4R-93)