บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตกำลังสูงหรือคอนกรีตที่มีกำลังอัดตั้งแต่ 420 กก./ซม^2 ขึ้นไปตามที่มาตรฐานเอซีไอ(ACI 363R-92 , 1996)ได้กำหนดไว้ และนำมาใช้งานกันบ้างแล้ว คอนกรีตกำลังสูงนี้จะนำไปใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแกร่ง หรือโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักมากเป็นพิเศษ เพื่อให้ได้ขนาดของโครงสร้างที่เล็กกว่าการใช้คอนกรีตกำลังปกติเช่น เสาของอาคารสูง ปล่องลิฟท์ คาน คานสะพานที่หล่อ ณ หน่วยงานก่อสร้าง และงานคอนกรีตหล่อสำเร็จ เป็นต้น ซึ่งในคอนกรีตกำลังสูงนี้มีส่วนผสมที่เป็นอนุภาคละเอียดผสมอยู่เป็นจำนวนมาก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ และมวลรวมละเอียด โดยเฉพาะปูนซีเมนต์ที่มีในปริมาณสูง ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการทำงานต่ำ มีความต้องการน้ำในปริมาณสูง และยังมีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงอีกด้วย จากปัญหาเหล่านี้ ได้มีการแก้ปัญหาโดยการใช้สารผสมเพิ่มเข้ามาช่วย เช่น สารลดน้ำปริมาณสูง (HRWR) สารกักกระจายฟองอากาศ ซิลิกาฟูม เถ้าลอย เป็นต้น

เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุราคาถูก ประเทศไทยสามารถผลิตได้เอง โดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินเป็นจำนวนมากในแต่ละวัน และในปัจจุบันเถ้าลอยจากแม่เมาะนี้ได้มีการควบคุมสารประกอบทางเคมีเพื่อให้ได้มาตรฐานเป็นไปตามคุณสมบัติของสารปอซโซลาน ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับคอนกรีต จึงทำให้เถ้าลอยแม่เมาะได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการออกแบบร่วมกับส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆให้กับคอนกรีต เช่น เพิ่มความสามารถในการทำงาน ลดอุณหภูมิในคอนกรีต ลดความต้องการน้ำของคอนกรีต เพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต เป็นต้น และนอกจากนั้นแล้วถ้าสามารถนำเอาเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่มีราคาสูงในปริมาณมากได้ ก็จะช่วยให้ต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลดลง

สำหรับเถ้าลอยในแต่ละแห่งหรือในแต่ละประเทศที่ผลิตได้นั้นจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปทั้งทางด้านเคมีและด้านกายภาพ โดยขึ้นอยู่กับคุณภาพของถ่านหินในแต่ละแหล่ง อุณหภูมิของการเผา และเตาที่ใช้ในการเผา เป็นต้น และนอกจากนั้นแล้วจากการศึกษาต่างๆที่ผ่าน

มายังพบอีกว่าเถ้าลอยที่ได้จากแหล่งเดียวกัน แต่ถูกคัดแยกให้มีความละเอียดต่างกันก็มีคุณสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพแตกต่างกันออกไปด้วยดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 1.1 ทำให้คุณภาพของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ได้แตกต่างกันถึงแม้ว่าจะใช้วิธีการผสมที่เหมือนกัน โดยเฉพาะในคอนกรีตกำลังสูงที่ต้องมีการควบคุมคุณภาพวัสดุที่ใช้ผสมเป็นอย่างดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเสนอวิธีการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะทั้งแบบคัดแยกขนาด และไม่คัดแยกขนาด เพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานในการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยสำหรับใช้ในประเทศไทยต่อไป

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเถ้าลอยก่อนการคัดแยกขนาดและเถ้าลอยความละเอียดสูง
ที่มา : เอกภพ อังศุวัฒนา และคณะ (2540)

องค์ประกอบทางเคมี(% โดยน้ำหนัก)	ชนิดของเถ้าลอย	
	เถ้าลอยก่อนการคัดแยกขนาด	เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง
Silicon Dioxide , SiO_2 , %	41.38	38.16
Aluminium Oxide , Al_2O_3 , %	20.97	20.74
Iron Oxide , Fe_2O_3 , %	11.75	11.60
Total (SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3) , %	74.10	70.5
Sulfur Trioxide , SO_3 , %	1.92	5.01
Calcium Oxide , CaO , %	13.06	14.01
Magnesium Oxide , MgO , %	2.34	2.15
Sodium Oxide , Na_2O , %	1.27	1.19
Potassium Oxide , K_2O , %	2.96	2.68
Loss on Ignition , LOI , %	1.84	4.50
Specific Gravity	2.12	2.60
Mean Diameter (micron)	18.9	2.8
Blaine Fineness (cm^2/g)	3602	14671

ในประเทศไทยนั้นมาตรฐานการออกแบบที่วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยใช้อยู่ ได้ยึดถือเอามาตรฐานของเอซีไอเป็นมาตรฐานใช้เป็นส่วนมาก และนอกจากนั้นแล้วมาตรฐานการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของเอซีไอก็ได้รับความนิยมมากอีกด้วยในประเทศไทย เพราะมีขั้นตอนการออกแบบและวิธีการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะทำการศึกษา

เกี่ยวกับวิธีการออกแบบสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยกำลังสูง(กำลังอัดมากกว่า 420 กก./ซม^2) โดยปรับปรุงจากวิธีการออกแบบคอนกรีตตามมาตรฐานเอซีไอ

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตยงสกุล (2537) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยทำการบดอัดเถ้าลอยแม่เมาะให้มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นด้วยเครื่องบดอัดชนิดพิเศษ แล้วนำมาทำมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่มีสัดส่วนเถ้าลอยต่างๆ กันเพื่อปรับปรุงกำลังอัด ผลการทดสอบทางเคมีพบว่าเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่ำ แต่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงเมื่อเทียบกับเถ้าลอยจากต่างประเทศ ผลการทดสอบกำลังอัดพบว่ามอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออายุครบ 3 7 และ 28 วัน แต่ถ้าบดอัดเถ้าลอยให้มีความละเอียดมากขึ้นจนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 325 เป็นจำนวน 97 % จะทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น 34% ที่อายุ 28 วัน

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล และคณะ (2538) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย และคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อผสมด้วยเถ้าลอยจากแม่เมาะ 2 ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่างกัน และมีปริมาณ SO_3 ต่างจากเถ้าลอยจากประเทศญี่ปุ่น จากการเปรียบเทียบพบว่าเถ้าลอยจากแม่เมาะมีปริมาณ CaO และ SO_3 สูงกว่า และปริมาณ SiO_2 ต่ำกว่าเถ้าลอยจากญี่ปุ่น ซึ่งเถ้าลอยจากแม่เมาะสามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C ส่วนเถ้าลอยจากญี่ปุ่นเป็นเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ตามมาตรฐาน ASTM C618 ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพเมื่อเปรียบเทียบกับถ้าลอยจากประเทศญี่ปุ่นแล้วเถ้าลอยจากแม่เมาะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า และมีปริมาณอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมครอนมากกว่า มีปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงกว่า (แต่ต่ำกว่ากรณีตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว) และมีกำลังอัดเท่าๆ กันเมื่อทดสอบโดยมอร์ต้า กล่าวโดยสรุปแล้ว เถ้าลอยจากแม่เมาะทั้งสองตัวอย่างมีคุณสมบัติที่ดีสามารถนำมาใช้เป็นสารปอซโซลานสำหรับผสมคอนกรีตได้

ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ(2540) ได้ทำการศึกษาการคัดเลือกเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต โดยทำการคัดเถ้าลอยจากแม่เมาะออกเป็น 5 ขนาดคือ เถ้าลอยที่ไม่ได้แยกขนาด และเถ้าลอยที่ได้จากการแยกด้วยเครื่องไซโคลนอีก 4 ขนาด ซึ่งลักษณะของเถ้าลอยที่

ได้จากการแยกขนาดนั้นจะมีสีออกไปทางเหลืองอ่อนสำหรับเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กที่สุด และจะค่อยๆมีสีที่เข้มขึ้นจนถึงเกือบดำเมื่อมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และจากการทดสอบพบว่าค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา(LOI) จะมีค่าต่ำมากเมื่อเถ้าลอยมีขนาดใหญ่ และจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเถ้าลอยมีขนาดเล็กลง ทางด้านองค์ประกอบทางเคมีพบว่าเถ้าลอยที่ไม่ได้แยกขนาดและที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 80 ส่วนในเถ้าลอยที่ละเอียดที่สุด (ขนาดเฉลี่ย 3.2 ไมครอน) จะมีออกไซด์ทั้งสามชนิดนี้รวมกันได้เท่ากับร้อยละ 74.63 ซึ่งมีค่าลดลงเล็กน้อย และพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแต่ละขนาดในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณต่างๆ จะมีค่าต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่ช่วงอายุก่อน 14 วันแรก แต่กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยที่ละเอียดที่สุดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จะสามารถพัฒนากำลังที่อายุที่ 14 วันได้สูงที่สุดและสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานร้อยละ 9 สำหรับที่อายุ 28 วัน มอร์ต้าร์ที่ได้จากส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ละเอียดที่สุดร้อยละ 25 จะให้กำลังอัดที่สูงสุด โดยสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานอยู่ร้อยละ 23 แต่มอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยที่ละเอียดที่สุดแทนที่ร้อยละ 35 จะให้กำลังอัดสูงที่สุดที่อายุ 60 วัน และ 90 วัน โดยสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานอยู่ร้อยละ 24 และ 23 ของมอร์ต้าร์มาตรฐานตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยที่มีขนาดหยาบในส่วนผสมทุกร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์จะมีการพัฒนากำลังอัดที่ช้าทั้งในช่วงต้นและปลาย ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าความละเอียดของเถ้าลอยมีผลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นและช่วงปลายให้มีมากขึ้นและเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ(2544) ได้ทำการศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะ โดยใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 450 ก.ก./ม.^{3} เถ้าลอยมีความละเอียด 2 ค่าคือ ไม่แยกขนาดและแยกให้ขนาดอนุภาคเล็กลง ซึ่งจะนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/(C+F)) 3 ค่าคือ 0.30 0.35 และ 0.40 และทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermo couple) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ที่ได้จากสัดส่วนผสมทั้งหมดเป็นคอนกรีตกำลังสูงมีกำลังอยู่ในช่วง 400 – 750 กก./ซม.^{2} ซึ่งมีแนวโน้มของอุณหภูมิสูงสุดในคอนกรีตลดลงเมื่อใช้ค่า W/(C+F) ที่สูงขึ้น การนำเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความร้อนของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย และพบว่าการนำเถ้าลอยที่ไม่ได้แยกขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ สามารถลดความร้อนได้ไม่ต่างจากการใช้เถ้าลอยที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว แต่กำลังอัดที่ได้ต่ำกว่าอย่างมากเมื่อใช้อัตราการแทนที่ระหว่างร้อยละ 20 – 60

1.2.2 คุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ทิน เกตุรัตนบวร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2540) ได้ทำการศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าลอยแม่เมาะที่ได้จากการแยกขนาดต่อกำลังอัด และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริค พบว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยที่ละเอียดที่สุดจะทำให้กำลังอัดสูงที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยที่หยาบกว่า และการผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 ถึง 30 จะให้กำลังที่สูงกว่าร้อยละ 40 และ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยขนาดเดียวกัน ส่วนด้านการต้านทานการกัดกร่อนพบว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริคได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีเถ้าลอยผสมอยู่ร้อยละ 0 20 30 และ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยในขนาดเดียวกัน และยังพบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากันมีแนวโน้มว่าตัวอย่างที่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) น้อยกว่าจะสามารถทนทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริคได้ดีกว่าตัวอย่างที่ใช้เถ้าถ่านหินที่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์สูงกว่า

เอกภพ อังศุวัฒนา และคณะ(2540) ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินลิกไนต์แยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง โดยนำเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปางมาแยกขนาดด้วยเครื่อง Air Classifier แล้วเลือกเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมครอน และมีค่าความละเอียดที่วัดโดยวิธีแบบเบลนเท่ากับ 14671 ซม.^{2}/ก.มา แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ พบว่าทำให้กำลังอัดโดยรวมดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหิน โดยเริ่มให้กำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหินตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไป และมีค่ากำลังอัดเทียบเป็นร้อยละ 113 ถึง 115 ของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหินที่อายุ 365 วัน นอกจากนั้นแล้วยังให้กำลังอัดคอนกรีตที่อายุต้นๆ ได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินไม่แยกขนาดมาแทนที่ได้อย่างมาก จึงทำให้สามารถขจัดปัญหาของการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตที่ต้องรอเวลานานเพื่อพัฒนากำลังหมดไป ส่วนด้านกำลังดึงของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์นี้จะให้กำลังดึงไม่แตกต่างจากตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหินที่อายุตั้งแต่ 14 วันเป็นต้นไป

ธีรราช ลีกีรติกุล และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2542) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตกำลังสูง พบว่าคอนกรีตใช้เถ้าลอยขนาดเล็กที่ได้จากการคัดแยกขนาด (อนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมโครเมตร) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 และ 35 ทำให้กำลังอัดโดยรวมดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย และยังให้กำลังที่สูงกว่าการใช้เถ้าลอยที่ไม่ได้คัดแยก

ขนาดที่อายุต้น ๆ ซึ่งค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่คัดขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ว่าร้อยละ 15 25 หรือ 35 เริ่มให้กำลังอัดมากว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยในช่วงอายุตั้งแต่ 7 วันขึ้นไป ทำให้ปัญหาการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดที่ช้าเนื่องจากการใช้เถ้าลอยที่ไม่ได้คัดขนาดในการผสมคอนกรีตหมดลงได้ นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่ละเอียดที่สุดแทนที่ปูนซีเมนต์จะมีค่ายุบตัวที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน และคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าลอยขนาดเล็กเป็นส่วนผสมจะทำให้การผสม การเทลงแบบ ตลอดจนการกระทุ้งหรือทำให้แน่นทำได้ง่ายกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย ส่งผลให้การใช้เถ้าลอยขนาดละเอียดมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ทำคอนกรีตกำลังสูง

วิศว จักรไพศาล และชัยโรจน์ จักรไพศาล (2542) ได้ทำการศึกษาผลของเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตสมรรถนะสูง (คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็ว สามารถใช้งานได้สะดวกและมีคุณภาพดีกว่าคอนกรีตธรรมดา) ด้วยการศึกษาหาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลง โดยใช้เถ้าลอยแม่เมาะ ซึ่งสามารถอธิบายกำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาเคมี แทนการประมาณปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งมีสมการเคมีที่ยุ่งยากกว่า พบว่าสาเหตุที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีกำอัดที่สูงขึ้นนั้นเกิดจากสารประกอบที่เพิ่มแรงอัดคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงตามปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 15 – 25 ของปูนซีเมนต์ ส่วนปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมทั้งทางด้านกำลังอัดและความสามารถทำงานได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์เพราะมีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมากที่สุด ส่วนปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมทางด้านความคงทนจะมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์น้อยสุด และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 0.26 –0.32 เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีสมรรถนะสูง

ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง และคณะ (2542) ได้นำเถ้าถ่านหินจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทยจำนวน 5 แหล่งรวมทั้งที่ อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน มาคัดแยกขนาดด้วยเครื่อง Air Classified Machine ให้มีความละเอียดต่างกันคือ ละเอียดมาก ละเอียดปานกลาง ละเอียดน้อย และไม่แยกขนาด แล้วนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เพื่อหาปริมาณที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเมื่อกำหนดค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 2 ซม. และทดสอบผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินบางชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ต้องใช้น้ำในอัตราส่วนผสมของ

คอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินแต่ละชนิดจะมีลักษณะของอนุภาค และความละเอียดที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลโดยตรงกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแต่ละชนิดจะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่าผลของความละเอียดของเถ้าถ่านหิน และกำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์ได้รวดเร็วกว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำกว่า

C.S. Poon et al. (2000) ได้ทำการศึกษาคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมด้วยเถ้าลอยแคลเซียมต่ำในปริมาณสูง เกี่ยวกับกำลังอัดประลัย ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การซึมผ่านของคลอไรด์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และความพรุนของเนื้อคอนกรีต ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.24 และเถ้าลอย 45% ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 80 เมกะปาสคาล โดยคอนกรีตที่เตรียมได้นี้จะมีความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว หรือคอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าลอยที่ใช้จะทำหน้าที่เป็นวัสดุมวลรวมขนาดเล็ก และเป็นวัสดุปอซโซลานช่วยเพิ่มคุณภาพของคอนกรีตในด้านกำลังอัด และเถ้าลอยยังช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเพสต์และมวลรวมในคอนกรีตด้วย

Karthik Obla et al.(2001) ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยที่ทำการคัดแยกขนาดด้วยเครื่อง air classified ที่มีความละเอียดสูงโดยมีขนาดเฉลี่ย 3 ไมครอน และมากกว่า 90% จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค 7 ไมครอน(มีความละเอียดมากกว่าเถ้าลอยปกติ) ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีเป็นไปตามเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มาเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก (Ultra High Strength Concrete > 1020 ksc) พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยความละเอียดสูง (Ultra Fine Fly Ash) นี้สูงกว่าเถ้าลอยปกติทั้งที่อายุต้นๆ และอายุที่มากขึ้นของคอนกรีต ในการนำเถ้าลอยความละเอียดสูงมาเป็นส่วนผสมคอนกรีตสามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังที่อายุ 28 วันเท่ากับ 94 MPa และกำลังที่อายุ 91 วันเท่ากับ 112 MPa และที่ปริมาณที่เท่ากันของซิลิกาฟูมกับเถ้าลอยความละเอียดสูงที่ใช้เป็นส่วนผสม คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยความละเอียดสูงจะมีกำลังสูงกว่า 10% นอกจากนี้แล้วการใช้เถ้าลอยความละเอียดสูงยังช่วยลดอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์และค่า RCP ในคอนกรีต และที่อายุมากขึ้นสมรรถนะของเถ้าลอยความละเอียดสูงในการช่วยลดอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ใกล้เคียงกับซิลิกาฟูม และเถ้าลอยความละเอียดสูงยังส่งผลอย่างมากในการลดการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลส์กับซิลิกา โดยพบว่าการแทนที่

ด้วยเถ้าลอยความละเอียดสูงประมาณ 12 % เพียงพอที่จะป้องกันการขยายตัวของคอนกรีตเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณอัลคาไลส์สูง และมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยา

1.2.3 วิธีการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอย

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2542) ได้ออกแบบแผนภูมิการออกแบบสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย เพื่อใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และอายุวันต่างๆ ในช่วง 3-365 วัน โดยศึกษาหน่วยน้ำหนักของ CaO ในวัสดุเชื่อมประสาน (ซีเมนต์+เถ้าลอย) ในการใช้คำนวณหากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน และได้ให้ความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่างหน่วยน้ำหนักของ CaO กับ fc'(28 วัน) โดยกราฟจะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) และอัตราส่วนของปริมาตรของซีเมนต์เพสกับปริมาตรของช่องว่างที่น้อยที่สุด (γ) ศึกษาอัตราส่วนระหว่าง SiO_2/CaO ในการใช้คำนวณหากำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงอายุ 3-365 วัน และได้ให้ความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง SiO_2/CaO กับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (ϕ) ส่วนการหากำลังอัดในช่วงอายุ 3-365 วัน สามารถหาได้จากสมการ $fc'(t) = \phi \times fc'(28)$ โดยวิธีการออกแบบส่วนผสมนี้ เป็นวิธีที่คิดค้นขึ้นมาโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 แบบจำลอง ซึ่งพัฒนาขึ้นเองโดยกลุ่มวิจัยของสมนึก ตั้งเติมสิริกุล แบบจำลองอันแรกใช้สำหรับประเมินค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน รวมไปถึงกำลังอัดที่อายุ 3 วัน จนถึง 1 ปีของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว แบบจำลองอันที่สองเป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับประเมินค่าการยุบตัวของคอนกรีต โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคของแข็งทุกชนิดในคอนกรีต ที่เกี่ยวข้องกับการยุบตัว ส่วนวิธีการคำนวณหาส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย สมนึก ตั้งเติมสิริกุลได้เสนอวิธีการ 2 วิธี คือ วิธีคำนวณซ้ำ (Iterative Design Method) และวิธีแบบง่าย (Simplified Design Method)

พัลลภ มาศรักษา (2544) ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานกับกำลังอัดของคอนกรีตกำลังปกติผสมเถ้าลอยแม่เมาะ สำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมตามวิธีการของเอซีไอ ที่กำลังอัดไม่เกิน 500 กก./ซม.^{2} และเพื่อศึกษาความต้องการน้ำของส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลง และผลของกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ โดยทดสอบชุดตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกัน 5 ค่าได้แก่ 0.38, 0.43, 0.48, 0.55 และ 0.62 แต่ละชุดตัวอย่างจะแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดอยู่ระหว่าง 8-10 ซม. จากผลการศึกษาพบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะจะลดลงตามปริมาณการ

แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15, 25 และ 35 จะทำให้ความต้องการน้ำลดลงร้อยละ 2.5 5 และ 7.5 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การทดสอบกำลังอัด พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 25 และ 35 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานระหว่าง 0.38-0.62 ให้ผลการทดสอบกำลังอัดเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย ตามลำดับดังนี้ ที่อายุ 7 วัน ให้กำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 85-94 75-85 และ 57-74 ที่อายุ 28 วัน ให้กำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 86-94 81-90 และ 73-81 ที่อายุ 56 วัน ให้กำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 93-99 89-98 และ 81-93 และที่อายุ 91 วัน ให้กำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 96-104 95-104 และ 88-95 นอกจากนี้ ในการทดลองยังสังเกตพบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังปกติผสมเถ้าลอยแม่เมาะด้วยวิธีการของเอซีไอ ใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่ร้อยละของการแทนที่เท่ากับ 15 25 และ 35 ที่อายุ 7 28 56 และ 91 วัน

ปีติวัฒน์ วัฒนชัย (2544) ได้ทำการศึกษาชุดตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกัน 4 ค่าได้แก่ 0.33 0.38 0.43 และ 0.48 แต่ละชุดตัวอย่างจะแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดเป็นศูนย์ โดยให้ค่าเวลาวีบีอยู่ระหว่าง 5-10 วินาที พบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการน้ำลดลงด้วย สำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การทดสอบกำลังอัด โดยการแทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 25 และ 35 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานระหว่าง 0.33-0.48 ให้ผลการ ทดสอบกำลังอัดเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยพบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ให้กำลังอัดดีที่สุดในช่วงอายุ 7-56 วัน นอกจากนี้ ในการทดลองยังสังเกตพบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานกับความหนาแน่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่ 0.38 ให้ความหนาแน่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมากที่สุด จากผลการวิจัย ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ด้วยวิธีการของเอซีไอ สามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่ร้อยละของการแทนที่เท่ากับ 15 25 และ 35 ที่อายุ 7 14 28 และ 56 วัน

M.K. Gopalan and M.N. Haque (1989) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของวิธีการออกแบบส่วนผสมต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้วิธีการผสม 3 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 เพิ่มปริมาณเถ้าลอย เข้าไปเท่ากับปริมาณซีเมนต์ที่ถูกแทนที่โดยปริมาตร วิธีที่ 2 เพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปเป็นสองเท่าของปริมาณซีเมนต์ที่ถูกแทนที่โดยปริมาตร และวิธีที่ 3 เพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปครึ่งหนึ่งของปริมาณซีเมนต์ที่ถูกแทนที่โดยปริมาตร ทำการเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 91 วัน โดยทดสอบกับส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 2 ค่า คือ 0.48 และ 0.35 พบว่าปริมาณความต้องการเถ้าลอยสำหรับการพัฒนากำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับระดับกำลังของคอนกรีต (Grade of Concrete) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่ลดลงจะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าลอยน้อยกว่าน้ำหนักของซีเมนต์ที่แทนที่ มีการพัฒนากำลังที่สูงกว่า คอนกรีตที่มีปริมาณของเถ้าลอยน้อยกว่าจะมีกำลังสูงกว่าเมื่ออยู่ในสภาพที่บ่มอย่างไม่เพียงพอ

Francis A. Oluokun (1994) ประยุกต์กฎของ Abrams ที่อธิบายผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้ใช้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยได้โดยตรง โดยเปลี่ยนเป็นผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เพื่อใช้ในการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้สมการของ Abrams (1.1) ซึ่งเป็นสมการของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ นั่นคือ

$$\log S = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{w}{c} \qquad (1.1)$$

จากข้อมูลการทดสอบของนักวิจัยหลายคนและโดยการพิจารณาความสัมพันธ์จากสมการที่ใช้วิเคราะห์ทางสถิติจะได้สมการซึ่งอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\log S = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{w}{c} + \alpha_3 \frac{w}{c+f} + \alpha_4(c) + \alpha_5(c+f) + \alpha_6 \frac{f}{c} + \alpha_7(f) + \alpha_8 \frac{c}{f} + \alpha_9(\tau) \qquad (1.2)$$

โดยที่ w, c, f คือ ปริมาณน้ำ, ซีเมนต์ และเถ้าลอย ตามลำดับมีหน่วยเป็นปอนด์

S คือ กำลังอัดคอนกรีต มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว

τ คือ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด มีหน่วยเป็นนิ้ว

α_1 ถึง α_9 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การวิเคราะห์เชิงถดถอย

จากการศึกษาของ Oluokun พบว่า สมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ออกแบบคอนกรีตผสม เถ้าลอยคือ

$$\log S_{28} = \alpha_1 + \alpha_3 \frac{w}{c+f} + \alpha_5 (c+f) + \alpha_8 \frac{c}{f} \qquad (1.3)$$

โดยที่ S_{28} คือ กำลังต้านรับแรงกดคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว

α_1 α_3 α_5และ α_8 คือค่าคงที่ พิจารณาจากการวิเคราะห์ของปฏิภาคส่วนผสม

จากการศึกษานี้ α_1 และ α_8 เป็นค่าบวก ในขณะที่ α_3 และ α_5 เป็นค่าลบสำหรับส่วนผสมส่วนใหญ่

Surasak Pongporncharoen (1997) ได้สร้างแบบจำลองในการทำนายความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าลอยในประเทศไทย ซึ่งวัดโดยการทดสอบหาค่าการยุบตัว (slump test) แบบจำลองนี้เป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย โดยมีตัวแปรหลักในการเกิดการยุบตัวของคอนกรีตคือ อัตราส่วนของปริมาตรของซีเมนต์เหลวกับปริมาตรของช่องว่างของมวลรวมทั้งหมด (γ) ปริมาณน้ำอิสระ (W_{fr}) และพื้นที่ผิวของมวลรวมทั้งหมด (S_{agg}) ปริมาตรของน้ำอิสระสามารถหาได้โดยการหักลบน้ำซึ่งถูกกักโดยอยู่ในและที่ผิวของ วัสดุผงและอนุภาคของมวลรวมจากปริมาณน้ำหนึ่งหน่วยของส่วนผสมคอนกรีต น้ำที่ถูกกักโดยวัสดุผงสามารถระเหยได้โดยง่ายจากการหาจุดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงโดยน้ำหนักมากที่สุดนั่นคือของเหลวที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ พื้นที่ผิวของอนุภาคมวลรวมคำนวณได้จากเส้นกราฟขนาดคละโดยการสมมุติว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม และคูณด้วยองค์ประกอบเหลี่ยมมุม (ψ) จากผลการทดสอบพบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับปริมาณน้ำอิสระ แต่ไม่เป็นเส้นตรงกับ γ และ S_{agg} และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าการยุบตัวของคอนกรีตและพิสูจน์ด้วยผลการทดสอบจริง โดยที่ค่า γ อยู่ระหว่าง 1.00-1.50 จะสามารถทำนายได้อย่างดี แต่ทำนายการยุบตัวของคอนกรีตที่มีการแยกตัวได้ไม่ดีนัก แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับคอนกรีตที่ต้องการทราบค่าการยุบตัวเพื่อใช้ในการหาค่าความสามารถในการทำงานได้ และไม่จำกัดสำหรับคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเท่านั้นแต่สำหรับวัสดุแทนที่อื่นๆที่รู้ค่าความสามารถในการกักน้ำด้วย

M. Akram Tahir and Pichai Nimityongskul (1998) ได้ทำการศึกษาการทดลองเกี่ยวกับการพัฒนากำลังของส่วนผสมคอนกรีตมากกว่า 130 ส่วนผสมที่มีการผสมเถ้าลอยซึ่งมีองค์

ประกอบทางเคมีและความละเอียดแตกต่างกันภายใต้การบ่มมาตรฐาน กำลังต้านรับแรงกดยังใช้ได้หลายส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อวัสดุเชื่อมประสานและน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานในช่วงกว้าง จากการศึกษาทั้งหมดได้ออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งประยุกต์จากสมการเคมีของปฏิกริยาไฮเดรชั่นและปฏิกริยาปอซโซลานิก สำหรับใช้ทำนายการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยระหว่าง 7-365 วัน โดยพิจารณาจากส่วนประกอบของสารเคมีในวัสดุเชื่อมประสาน และความละเอียดของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย ผลการคำนวณจากสมการที่ออกแบบไว้ ปรากฏว่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

B.H. Bharatkumar et al.(2001) ได้ศึกษาหาวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่อ้างอิงกับวิธีของเอซีไอ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ต่อน้ำ (c/w) สำหรับชุดส่วนผสมหนึ่งๆ ที่อายุและการบ่มแบบเดียวกัน กำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนปริมาณน้ำอิสระต่อปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม ตามกฎของ Abram ซึ่งสามารถแสดงเป็นฟังก์ชันตามแบบของ Belomey ดังนี้

$$S = A_1(c/w) + A_2 \qquad (1.4)$$

โดยที่ c คือ ปริมาณซีเมนต์ , กก./ม.^{3}

w คือ ปริมาณน้ำ , กก./ม.^{3}

S คือ กำลังอัด , เมกะปาสคาล

A_1 , A_2 คือ ค่าคงที่ใดๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวม และซีเมนต์

โดยใช้ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่า w/c มาวิเคราะห์หาค่าคงที่ A_1 , A_2 ที่อายุต่างๆของคอนกรีต โดยเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์ต่ำสุด 330 กก./ม.^{3} สูงสุด 530 กก./ม.^{3} และปริมาณน้ำ 172 กก./ม.^{3} เพื่อให้ได้ค่า w/c สูงสุดเท่ากับ 0.52 และต่ำสุดเท่ากับ 0.33 จากนั้นจึงนำเอาความสัมพันธ์ข้างต้นมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวคูณประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ซีเมนต์ (CRM)

ตัวคูณประสิทธิภาพ , k สามารถหาได้จากกำลังอัดที่ได้จากส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน(w/b) เท่ากับ 0.33 และ 0.52 สำหรับการใช้เถ้าลอยและตะกรันเป็น CRM ดังสมการ

$$S = A_1(c+kf)/w + A_2 \qquad (1.5)$$

$$c+ kf = w[S-A_2]/A_1 \qquad (1.6)$$

$$k = (1/f)\{-c+w(S-A_2)/A_1\} \qquad (1.7)$$

โดยที่ f คือ ปริมาณวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ซีเมนต์ , กก./ม.^{3}

พบว่าค่าของ k นั้นมีผลจาก w/(c+f) , ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ซีเมนต์ , เปอร์เซนต์การแทนที่ และอายุการทดสอบ สำหรับกำลังอัดใดๆ ค่า w/b ประสิทธิผล(w/(c+kf)) อาจหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1.5) และปริมาณปูนซีเมนต์กับวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ซีเมนต์สามารถหาได้โดยรักษาปริมาณน้ำให้คงที่

จากสมการที่ความสัมพันธ์ที่เสนอ ได้ทำการทดลองตรวจสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีตที่ w/b เท่ากับ 0.40 และ 0.38 พบว่าค่าที่ได้จากทำนายด้วยสมการมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองผสม

Youjun Xie et al.(2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงแบบอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self – compacting concrete) ที่ใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง (Ultrapulverized fly ash , UPFA) และสารซูเปอร์พลาสติก (Superplasticizer) พบว่าคอนกรีตกำลังสูงแบบอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีกำลังอัด 60 – 80 เมกะปาสคาล จะใช้เถ้าลอย (UPFA) ที่มีความละเอียดที่วัดโดยวิธีแบบเบลนโดยมีค่าในช่วง 500 – 600 ม.^{2}/กก. เป็นส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้ในปริมาณ 30 – 40 % ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน และปริมาณรวมของวัสดุเชื่อมประสานจะต้องไม่น้อยกว่า 500 กก./ม.^{3} และอัตราส่วนของปริมาณทรายจะต้องไม่น้อยกว่า 40% ของปริมาณมวลรวมทั้งหมด ส่วนปริมาณน้ำและสารซูเปอร์พลาสติกจะถูกกำหนดโดยความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต โดยข้อจำกัดของปริมาณน้ำจะสัมพันธ์กับปริมาณสารซูเปอร์พลาสติกที่เหมาะสม นอกจากนั้นยังพบว่า UPFA ช่วยให้ขนาดคละของวัสดุเชื่อมประสานดีขึ้น โดยมันจะทำหน้าที่เป็นวัสดุที่คอยอุดช่องว่าง และ UPFA ยังทำให้คอนกรีตมีความเหนียวช่วยต้านการแยกตัวของคอนกรีตสด แต่ไม่ทำให้ความสามารถในการไหลลดลง ซึ่งให้ผลเหมือนกับการใช้ viscous agent นอกจากนี้การใช้ UPFA เป็นส่วนผสมคอนกรีตจะทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น ป้องกันการซึมได้ดี และลดการหดตัวของคอนกรีต

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาความต้องการน้ำของส่วนผสม และกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมด้วยเถ้าลอยทั้งแบบคัดแยกขนาดและไม่คัดแยกขนาดในร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

2. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน W/(C+P) (น้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน) และขนาดของเถ้าลอยกับกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยในรูปแบบแผนภูมิสำหรับการแทน

ที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสานทั้งเถ้าลอยแบบคัดแยกขนาดและไม่คัดแยกขนาด และเปรียบเทียบกับชุดคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แล้วนำผลที่ได้มาใช้ในการออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่ไม่ได้ทำการคัดแยกขนาด และเถ้าลอยที่คัดแยกขนาด โดยปรับปรุงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานเอซีไอ

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์

ได้เข้าใจถึงอิทธิพลของขนาดเถ้าลอยที่บ่งบอกในรูปค่าความละเอียดและอัตราส่วน W/(C+P) ที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอย และนำเอาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน W/(C+P) และความละเอียดของเถ้าลอยกับกำลังอัดของคอนกรีตสำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ไปปรับปรุงวิธีการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะ โดยปรับปรุงจากมาตรฐานเอซีไอซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถนำไปใช้ออกแบบในงานก่อสร้างที่ต้องการใช้คอนกรีตกำลังอัดสูง เช่น ปล่องลิฟท์ งานคอนกรีตอัดแรง งานเสาโครงสร้าง งานคอนกรีตหล่อสำเร็จ เป็นต้นซึ่งจะช่วยให้ลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลง เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างถูกลง และยังเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางเศรษฐกิจได้อีกทางหนึ่งด้วย

1.5 สมมติฐานการวิจัย

ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผสมด้วยเถ้าลอยทั้งแบบคัดแยกขนาดและไม่คัดแยกขนาด ในคอนกรีตด้วยวิธีการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

1.6 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาถึงวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอย ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดทรงกระบอกที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า 420 กก./ซม.^{2} โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

ก. กำหนดค่าการยุบตัวในช่วง 5 – 8 ซม.

ข. เลือกใช้หินขนาดใหญ่สุด 3/8 นิ้ว ตลอดการทดสอบ

ค.ทรายและหินที่ใช้ในงานวิจัย จะทำการล้างและอบจนแห้งแล้วบรรจุเก็บไว้ในภาชนะปิดมิดชิด

ง. ทำการทดสอบเลือกปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแต่ละขนาด ระหว่างร้อยละ 0 – 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

จ. เลือกทำการทดสอบค่าอัตราส่วน W/(C+P) ในช่วง 0.35 – 0.44

ฉ. เถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบเป็นเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ทั้งเถ้าลอยแบบที่ไม่ได้ทำการแยกขนาดที่มีค่าความละเอียดที่ทดสอบโดยวิธีแบบเบลนประมาณ 2500 ซม.^{2}/ก. และเถ้าลอยที่คัดแยกขนาดที่ได้จากการนำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผ่านเครื่องคัดแยกของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 1 ครั้งมีค่าความละเอียดที่ทดสอบโดยวิธีแบบเบลนประมาณ 3700 ซม.^{2}/ก.

ช. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง

ซ. กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า 420 กก./ซม.^{2}

ฌ. ไม่ใส่สารกักกระจายฟองอากาศ

ญ. ไม่ใส่สารลดน้ำ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University