

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในการก่อสร้างบางประเภทนั้นต้องการคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์เพื่อความสะดวกในการใช้แบบต่อ หรือต้องการกำลังตันที่ จึงจำเป็นต้องออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้พอเหมาะที่จะทำให้คอนกรีตไม่มีการยุบตัวเลย และเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ในการก่อสร้างเป็นจำนวนมาก เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอย ที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับคอนกรีต ประกอบกับเถ้าลอยเป็นวัสดุราคาถูกสามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ ทำให้เถ้าลอยได้รับความนิยมในการนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมากขึ้น และถ้าสามารถนำเอาส่วนผสมของเถ้าลอยมาใช้ในการออกแบบร่วมกับส่วนผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ซีเมนต์ซึ่งมีราคาแพงกว่าก็จะช่วยให้ลดต้นทุนการผลิตลง และถ้าวิธีการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอยไม่ยุ่งยากมากเกินไป ก็จะทำให้ คอนกรีตผสมเถ้าลอยเป็นที่นิยมใช้กันมากยิ่งขึ้นและเป็นทางเลือกใหม่ของการผลิตคอนกรีตในปัจจุบัน

เป็นที่ทราบกันดีว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับด่างที่อุณหภูมิปกติแล้วให้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายกับสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาดังกล่าวของเถ้าลอยว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) และเรียกวัสดุที่มีคุณสมบัติดังกล่าวว่า วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material) จากคุณสมบัติดังกล่าว หากนำเถ้าลอยไปใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีต คุณสมบัติของเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ในกรณีนี้จึงสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลงได้ ด้วยการใส่เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน และจะช่วยทำให้ต้นทุนการผลิตคอนกรีตลดลงด้วย เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์มาก นอกจากนี้ ยังพบว่าเถ้าลอยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับคอนกรีตได้อีกมากในหลายด้านไม่ว่าจะเป็นเพิ่มความสามารถได้ ลดความร้อนและการหดตัวของคอนกรีต ด้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทย เนื่องจากในปัจจุบันเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้มีความพยายามที่จะควบคุมสารประกอบทางเคมี เพื่อให้ได้มาตรฐานเป็นไปตามคุณสมบัติของสารปอซโซลาน ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ทำให้เถ้าลอยจากแม่เมาะเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในงานคอนกรีตมากขึ้น แต่เนื่องจากเถ้าลอยในแต่ละแห่งหรือในแต่ละประเทศมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปทำให้คุณภาพของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ได้ไม่เหมือนกัน ถึงแม้ว่าจะใช้วิธีการผสม

ที่เหมือนกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเสนอถึงวิธีการออกแบบคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ ผสมเถ้าลอยแม่เมาะเพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานในการออกแบบคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ผสมเถ้าลอยสำหรับใช้ในประเทศไทยต่อไป

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะ

ที่มา : ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2541)

* กมล ปาโกวงศ์ (2543)

องค์ประกอบเคมี	ปริมาณร้อยละเฉลี่ย, %โดยน้ำหนัก								
	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542*
SiO ₂	42.8	40.3	43.1	52.8	40.6	40.6	41.5	37.3	41.3
Al ₂ O ₃	23.3	24.0	20.2	18.0	22.8	23.6	28.1	22.1	22.3
Fe ₂ O ₃	14.0	15.0	13.2	8.5	12.8	13.0	12.3	14.4	11.6
CaO	10.5	11.2	13.0	13.3	14.4	13.0	10.0	11.4	11.6
SO ₃	3.9	3.1	2.6	2.8	2.8	2.4	2.0	2.5	1.8
MgO	2.4	2.8	2.7	1.4	2.5	2.5	1.2	2.7	3.3
Na ₂ O	0.8	1.0	1.3	0.9	0.7	1.2	0.6	1.1	1.3
K ₂ O	2.3	2.6	2.4	2.0	2.0	3.0	3.3	2.7	2.9
Loss on Ignition	0.7	0.5	0.6	0.3	0.9	0.7	0.8	0.1	0.1

เนื่องจากทางวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้ยึดถือมาตรฐานของสถาบันคอนกรีตอเมริกาเป็นส่วนใหญ่ และการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของสถาบันคอนกรีตอเมริกาได้รับความนิยมมากในประเทศไทย เพราะมีขั้นตอนการออกแบบและวิธีการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการออกแบบคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่กำลังอัดปกติ (ไม่เกิน 500 กก/ซม.²) โดยปรับปรุงจากวิธีการออกแบบคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยแม่เมาะ

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

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ (2538) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ส่วนประกอบทางเคมี เมื่อผสมคอนกรีตเถ้าลอยลิกไนท์จากแม่เมาะ 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีปริมาณ SO_2 ต่างกันกับเถ้าลอยจากประเทศญี่ปุ่น จากการเปรียบเทียบพบว่าเถ้าลอยลิกไนท์จากแม่เมาะมีปริมาณ CaO และ SO_3 สูงกว่า และปริมาณ SiO_2 ต่ำกว่าเถ้าลอยจากญี่ปุ่น ซึ่งเถ้าลอยจากแม่เมาะสามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C ส่วนเถ้าลอยจากญี่ปุ่นเป็นเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ตามมาตรฐาน ASTM ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากประเทศญี่ปุ่นแล้วเถ้าลอยจากแม่เมาะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า และมีปริมาณอนุภาคใหญ่กว่า 50 ไมครอนมากกว่า มีปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงกว่า (แต่ต่ำกว่ากรณีของตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว) และมีกำลังเท่าๆ กันเมื่อทดสอบโดยมอร์ต้า กล้าวโดยสรุปแล้ว เถ้าลอยจากแม่เมาะทั้งสองตัวอย่างมีคุณสมบัติที่ดีสามารถนำมาใช้เป็นสารปอชโซลานสำหรับผสมคอนกรีตได้

เสกสรรค์ ชูทับทิม และคณะ (2542) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบศักยภาพของเถ้าถ่านหินในประเทศไทยจำนวน 5 แหล่งผลิต เมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพและเคมี พบว่ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกันและนำไปใช้เป็นสารปอชโซลานได้ รวมทั้งทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่อายุ 3 7 14 28 60 และ 90 วัน พบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าถ่านหินจากทุกแหล่งผลิตจะมีค่าสูงขึ้น โดยที่ดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน มีค่าระหว่างร้อยละ 70 ถึง 83 และดัชนีกำลังเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ

76 ถึง 90 เมื่อมอร์ดาร์มีอายุ 28 วัน ซึ่งดัชนีกำลังของเถ้านหินจากแต่ละแหล่งจะขึ้นอยู่กับความละเอียดเป็นปัจจัยสำคัญ และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหิน

1.2.2 คุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ

ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ (2540) ศึกษาเกี่ยวกับการคัดเลือกเถ้าลอยเถ้านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยเถ้านหินจากโรงไฟฟ้าที่ 10 จากแม่เมาะทำการแยกขนาดออกเป็น 4 ขนาดได้แก่ ชุดตัวอย่าง FAO คือขนาดที่ไม่ได้ทำการแยกใดๆทั้งสิ้น ชุดตัวอย่าง CFA1 คือเถ้านหินที่หยาบที่สุด CFA2 คือเถ้านหินที่ตกอยู่ที่ฐานของเครื่อง Cyclone และไม่สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ ชุดตัวอย่าง CFA3 คือเถ้านหินที่ตกอยู่ที่ฐานของเครื่อง Cyclone และสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ ชุดตัวอย่าง CFA4 คือเถ้านหินที่ละเอียดที่สุดที่อยู่ในกล่องดักฝุ่น พบว่าความละเอียดหรือขนาดอนุภาคของเถ้านหินเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญอย่างยิ่งต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน เถ้านหินที่มีขนาดเล็กจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็ว และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินที่ละเอียดที่สุดในปริมาณไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จะสามารถให้มอร์ดาร์ที่มีกำลังอัดที่อายุก่อน 28 วันเท่ากับหรือสูงกว่ามอร์ดาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้านหิน

ทิน เกตุรัตนบวร และคณะ (2541) ศึกษาการใช้เถ้านหินแยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง พบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินละเอียดมากๆ ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำให้กำลังอัดโดยรวมดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้านหิน โดยเริ่มให้กำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้านหินตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไป ซึ่งมีกำลังอัดเทียบเป็นร้อยละ 113 ถึง 115 ของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้านหินที่อายุ 365 วัน ซึ่งผลที่ได้นี้แตกต่างจากการใช้เถ้านหินที่ไม่ได้ผ่านการคัดขนาดมาแทนที่อย่างมากที่ให้กำลังอัดที่ต่ำในช่วงอายุต้นๆ ส่วนค่ากำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้านหินเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้านหินผสมอยู่ พบว่าค่ากำลังดึงไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่ากำลังดึงที่อายุ 365 วันเป็นร้อยละ 99 ถึง 103 ของตัวอย่างที่ไม่ใช้เถ้านหิน แสดงว่าการใช้เถ้านหินขนาดละเอียดมาก ๆ ไม่ได้ช่วยให้กำลังดึงของคอนกรีตดีขึ้นมากนัก เพราะผลที่เกิดขึ้นจากการอัดตัว (Packing Effect) ที่เกิดขึ้นในกรณีของกำลังอัดจะมีผลน้อยมากในกรณีรับแรงดึงของคอนกรีต

วิศว จักรไพศาล และ ชัยโรจน์ จักรไพศาล (2542) ศึกษาผลของเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยใช้เถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ศึกษาหา

ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลง มาอธิบายกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาเคมี แทนการหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตซึ่งมีสมการทางเคมีที่ยากกว่า โดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยการวัดความร้อนภายใต้แรงสุญญากาศ (Thermogravimetry Analysis, FGA) พบว่า สาเหตุที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีกำลังอัดที่สูงขึ้น เนื่องจากเกิดสารประกอบที่เพิ่มแรงอัด (แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต) เพิ่มขึ้น และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงตามปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 15-25 ของปูนซีเมนต์ ส่วนปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมทั้งด้านกำลังอัดและความสามารถทำงานได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 ของปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก เพราะมีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตมากที่สุด ส่วนปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมด้านความคงทน จะมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์น้อยสุด และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่เหมาะสม ควรอยู่ระหว่าง 0.26-0.32 เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีสมรรถนะสูง

ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง และคณะ (2542) ได้นำเถ้าถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทยจำนวน 5 แหล่งรวมถึงที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน มาแยกขนาดด้วย Air Classifier Machine ให้มีความละเอียดต่างกันคือ ละเอียดมาก ละเอียดปานกลาง ละเอียดน้อย และไม่แยกขนาด แล้วนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เพื่อหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเมื่อกำหนดค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 2 ซม. และทดสอบผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินบางชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ต้องใช้น้ำในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินแต่ละชนิดจะมีลักษณะของอนุภาค และความละเอียดที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลโดยตรงกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแต่ละชนิดจะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่าผลของความละเอียดของเถ้าถ่านหิน และกำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผันตรงตามความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์อย่างรวดเร็วกว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำกว่า

1.2.3 ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์

Surasak Pongpormcharoen (1997) ได้สร้างแบบจำลองในการทำนายความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าลอยในประเทศไทย ซึ่งวัดโดยการทดสอบหาค่าการยุบตัว (slump test) แบบจำลองนี้เป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย โดยมีตัวแปรหลักในการเกิดการยุบตัวของคอนกรีตคือ อัตราส่วนของปริมาตรของซีเมนต์เหลวกับปริมาตร

ของช่องว่างของมวลรวมทั้งหมด (γ) ปริมาณน้ำอิสระ (W_{free}) และพื้นที่ผิวของมวลรวมทั้งหมด (S_{agg}) ปริมาตรของน้ำอิสระสามารถหาได้โดยการหักลบน้ำซึ่งถูกกักโดยอยู่ในและที่ผิวของ วัสดุผงและอนุภาคของมวลรวมจากปริมาณน้ำหนึ่งหน่วยของส่วนผสมคอนกรีต น้ำที่ถูกกักโดยวัสดุผงสามารถระเหยได้โดยง่ายจากการหาจุดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงโดยน้ำหนักมากที่สุดนั่นคือของเหลวที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ พื้นที่ผิวของอนุภาคมวลรวมคำนวณได้จากเส้นกราฟขนาดคละโดยการสมมติว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม และคูณด้วยองค์ประกอบเหลี่ยมมุม (ψ) จากผลการทดสอบพบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับปริมาณน้ำอิสระ แต่ไม่เป็นเส้นตรงกับ γ และ S_{agg} และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าการยุบตัวของคอนกรีตและพิสูจน์ด้วยผลการทดสอบจริง โดยที่ค่า γ อยู่ระหว่าง 1.00-1.50 จะสามารถทำนายได้อย่างดี แต่ทำนายการยุบตัวของคอนกรีตที่มีการแยกตัวได้ไม่ดีนัก แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับคอนกรีตที่ต้องการทราบค่าการยุบตัวเพื่อใช้ในการหาค่าความสามารถในการทำงานได้ และไม่จำกัดสำหรับคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเท่านั้นแต่สำหรับวัสดุแทนที่อื่นๆ ที่รู้ค่าความสามารถในการกักน้ำด้วย

Sukunya Nutalaya (1994) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของก้อนคอนกรีตปูถนนราคาถูกที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะผสม ก้อนปูถนนผลิตได้โดยการใช้เครื่องกด เพื่อศึกษาคุณสมบัติและแบ่งชนิดของก้อนคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะในส่วนผสมที่ต่างกัน ตัวแปรหลักคือชนิดของสารปอซโซลาน ร้อยละของการแทนที่ของสารปอซโซลาน และปริมาณที่ผสมเพิ่ม เถ้าเปลือกถั่วและขี้เถ้าแกลบได้นำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับ คุณสมบัติทางกลของก้อนปูถนนที่ตรวจสอบคือ กำลังด้านรับแรงกดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน กับความต้านทานการดัดที่อายุ 30 วัน ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพที่พิจารณา คือ การดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน และเวลาในการก่อตัว ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบใช้ค่าที่ให้กำลังด้านแรงกดสูงที่สุดภายใต้ค่าการไหลอยู่ในช่วงร้อยละ 2 ถึง 8 ที่ส่วนผสมสามารถขึ้นรูปได้ ผลการทดสอบแสดงว่าร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยที่เหมาะสมในซีเมนต์ในการผลิตก้อนคอนกรีตปูถนนคือร้อยละ 35 โดยดูจากกำลังด้านรับแรงกด

1.2.4 วิธีการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอย

พัลลภ มาศรักษา (2544) ได้ทำการศึกษาโดย ทดสอบชุดตัวอย่าง 20 ชุด ประกอบด้วย ชุดตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกัน 5 ค่าได้แก่ 0.38 0.43 0.48 0.55 และ 0.62 แต่ละชุดตัวอย่างจะแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0 15 25 และ 35 โดยน้ำหนัก

ของวัสดุเชื่อมประสาน และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดอยู่ระหว่าง 8-10 ซม. ทดสอบความสามารถได้ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อายุ 7 28 56 และ 91 วัน ผลการวิจัย พบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น 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 ตามลำดับ ดังนี้ 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 และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะด้วยวิธีการของเอซีไอ ใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 25 และ 35 ที่อายุ 7 28 56 และ 91 วัน

สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล (2542) ได้ออกแบบแผนภูมิการออกแบบสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย เพื่อใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และอายุวันต่างๆ ในช่วง 3-365 วัน โดยศึกษาหน่วยน้ำหนักของ CaO ในวัสดุเชื่อมประสาน (ซีเมนต์-เถ้าลอย) ในการใช้คำนวณหาลำกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน และได้ให้ความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง หน่วยน้ำหนักของ CaO กับ $f_c'(28 \text{ วัน})$ โดยกราฟจะขึ้นอยู่กั อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) และอัตราส่วนของปริมาตรของซีเมนต์เพศกับปริมาตรของช่องว่างที่น้อยที่สุด (γ) ศึกษาอัตราส่วนระหว่าง SiO_2/CaO ในการใช้คำนวณหาลำกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงอายุ 3-365 วัน และได้ให้ความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง SiO_2/CaO กับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (ϕ) ส่วนการหาลำกำลังอัดในช่วงอายุ 3-365 วัน สามารถหาได้จากสมการ $f_c'(t) = \phi \times f_c'(28)$ โดยวิธีการออกแบบส่วนผสมนี้ เป็นวิธีที่คิดค้นขึ้นมาโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 แบบจำลอง ซึ่งพัฒนาขึ้นเองโดยกลุ่มวิจัยของสมนึก ตั้งเต็มศิริกุล แบบจำลองอันแรกใช้สำหรับประเมินค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน รวมไปถึงกำลังอัดที่อายุ 3 วัน จนถึง 1 ปีของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว แบบจำลองอันที่สองเป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับประเมินค่าการยุบตัวของคอนกรีต โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคของแข็งทุกชนิดในคอนกรีต ที่เกี่ยวข้องกับการยุบ

ตัว ส่วนวิธีการคำนวณหาส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย สมนี้ก ตั้งเดิมสิริกุลได้เสนอวิธีการ 2 วิธี คือ วิธีคำนวณซ้ำ (Iterative Design Method) และวิธีแบบง่าย (Simplified Design Method)

Makoto Ashino (1984) ได้ศึกษาผลขององค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพคือ กำลังต้านรับแรงกด กำลังต้านรับแรงดึงแบบผ่าซีก และความทนทานต่อการคองของเถ้าลอย มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ซึ่งใช้เถ้าลอยจากแม่เมาะ ได้ใช้เถ้าลอย 3 ชนิดใน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยได้กำหนดค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 5.08 ถึง 7.62 ซม. ผลการทดสอบพบว่าเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์กับอลูมิเนียมออกไซด์ต่ำมาก และจากข้อค้อยนี้เป็นสาเหตุให้การพัฒนากำลังของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอยซ้ำ เถ้าลอยแม่เมาะสามารถใช้แทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้ตั้งแต่ร้อยละ 35 ขึ้นไป เป็นอัตราส่วน 1 ต่อ 2.75 หรือ 1 ต่อ 3.5 ในส่วนผสมมอร์ตาร์ ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มี กำลังต้านรับแรงกดสูงสุดเท่ากับ 350 kg/m^3 คือการแทนที่ร้อยละ 35 และคอนกรีตผสมเถ้าลอยมี กำลังต้านรับแรงดึงดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

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 พบว่า ปริมาณความต้องการเถ้าลอยสำหรับการพัฒนากำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับระดับกำลังของคอนกรีต (Grade of Concrete) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่ลดลงจะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าลายน้อยกว่าน้ำหนักของซีเมนต์ที่แทนที่ มีการพัฒนากำลังที่สูงกว่า คอนกรีตที่มีปริมาณของเถ้าลายน้อยกว่าจะมีกำลังสูงกว่าเมื่ออยู่ในสภาพที่บ่มอย่างไม่เพียงพอ

Francis A. Oluokun (1994) ประยุกต์กฎของ Abrams ที่อธิบายผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้ใช้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยได้โดยตรง โดยเปลี่ยนเป็นผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เพื่อใช้ในการออก

แบบคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้สมการของ Abrams (1.1) ซึ่งเป็นสมการของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ นั่นคือ

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

จากข้อมูลการทดสอบของนักวิจัยหลายคนและโดยการพิจารณาความสัมพันธ์จากสมการที่ใช้วิเคราะห์ทางสถิติจะได้สมการซึ่งอยู่ในรูปแบบดังนี้

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

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

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

โดยที่ S_{28} คือ กำลังด้านรับแรงกดคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว

$\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5$ และ α_8 คือค่าคงที่ พิจารณาจากการวิเคราะห์ของปฏิภาคส่วนผสม

จากการศึกษา α_1 และ α_8 เป็นค่าบวก ในขณะที่ α_3 และ α_5 เป็นค่าลบสำหรับส่วนผสมส่วนใหญ่

M. Akram Tahir and Pichai Nimityongskul (1998) ได้ทำการศึกษาการทดลองเกี่ยวกับการพัฒนากำลังของส่วนผสมคอนกรีตมากกว่า 130 ส่วนผสมที่มีการผสมเถ้าลอยซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดแตกต่างกันภายใต้การบ่มมาตรฐาน กำลังด้านรับแรงกดยังใช้ได้หลายส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อวัสดุเชื่อมประสานและน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานในช่วงกว้างจากการศึกษาทั้งหมดได้ออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งประยุกต์จากสมการเคมีของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก สำหรับใช้ทำนายการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยระหว่าง 7-365 วัน โดยพิจารณาจากส่วนประกอบของสารเคมีในวัสดุเชื่อมประสาน และความ

ละเอียดของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย ผลการคำนวณจากสมการที่ออกแบบไว้ปรากฏว่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละต่างๆ ที่มีผลต่อความต้องการน้ำในส่วนผสม และศึกษาความหนาแน่นและผลของกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

1.3.2 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง w/b กับ fc' ในรูปของแผนภูมิ สำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ ร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน และเปรียบเทียบกับชุดคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย เพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ด้วยวิธีการของ ACI Committee 211.3-75 (Revised 1987) (Reapproved 1992) (1992)

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์

ได้วิธีการออกแบบคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่กำลังอัดปกติ (ไม่เกิน 500 กก./ชม.²) โดยปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่าง w/b กับ fc' สำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 25 และ 35 ให้ใช้ได้กับวิธีการของมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกาซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน สามารถนำไปใช้ออกแบบในงานก่อสร้างทั่วไปที่ต้องการใช้คอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ เช่นงานคอนกรีตหล่อสำเร็จ ซึ่งจะช่วยให้ลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลง เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างถูกลง และยังเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในแง่เศรษฐกิจได้อีกทางหนึ่งด้วย เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้กับงานก่อสร้างทั่วไป

1.5 สมมุติฐานการวิจัย

1.5.1 เถ้าลอยแม่เมาะที่ใช้ในงานคอนกรีตมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย

1.5.2 ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผสมเถ้าลอยในคอนกรีตด้วยวิธีการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

1.6 ขอบเขตของการศึกษา

ทำการศึกษาดังวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาที่ผสมเถ้าลอยซึ่งมีกำลังรับแรงอัดทรงกระบอกขนาด 10x20 ซม. ที่อายุ 28 วัน ไม่เกิน 500 กก./ชม.² โดยมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

ก. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ข. ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
อำเภอแม่เมะ จังหวัดลำปาง

ค. กำหนดค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ และค่าเวลาวิบัติอยู่ในช่วง 5-10 วินาที

ง. เลือกทำการทดสอบค่าอัตราส่วน w/b ในช่วง 0.33-0.48 สำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย
ร้อยละ 15 25 และ 35

จ. เลือกใช้หินขนาดใหญ่สุดขนาด 3/4 นิ้ว ตลอดการทดลอง

ฉ. ไม่ใส่สารกักกระจายฟองอากาศ และสารลดปริมาณน้ำ