บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

การก่อสร้างในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นทั้งในด้านการออกแบบวิธีการก่อสร้างและวัสดุก่อสร้างซึ่งในส่วนวัสดุก่อสร้างคอนกรีตถือได้ว่าสิ่งที่สำคัญมากชนิดหนึ่งที่ใช้ในการก่อสร้าง การพัฒนาคุณภาพของงานคอนกรีตในปัจจุบัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้คอนกรีตที่มีคุณภาพสูงขึ้นกว่าในอดีตและต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในทุกสภาพไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตในสภาพเหลวและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับวัสดุในการผลิตคอนกรีต ซึ่งในปัจจุบันการศึกษาวัสดุดังกล่าวได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากโดยมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งคอนกรีตในสภาพเหลว เช่น ความสามารถเทได้ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด และความทนทานเป็นต้น วัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นสารผสมแบบแร่ธาตุของกลุ่ม " สารปอซโซลาน " ดังตัวอย่างเช่น ขี้เถ้าลอย (Fly ash) ขี้ตะกรันจากเตาถลุง (Blast Furnace Slag) และฟูมของซิลิกา (Silica Fume) ฯลฯ ความหมายของสารปอซโซลาน (Pozzolan) [1] คือ วัสดุที่มีสารซิลิกาและหรือที่มีสารอลูมินาเป็นองค์ประกอบโดยวัสดุดังกล่าวไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้องแล้ว ผลของปฏิกิริยาที่ได้จะมีคุณสมบัติเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์ ซึ่งปฏิกิริยาของสารปอซโซลานดังกล่าวเรียกว่า " ปฏิกิริยาปอซโซลานิก "

สารปอซโซลานมี 2 ชนิด ที่เกิดเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolans) และที่มนุษย์ผลิตขึ้น (Man-made Pozzolans) ปอซโซลานตามธรรมชาติส่วนมากมีต้นกำเนิดจากภูเขาไฟซึ่งในอดีต วัสดุประเภทนี้ได้นำมาใช้ประโยชน์เป็นปูนก่อหรือปูนปั้นของชาวกรีกและชาวโรมันเช่น หินภูเขาไฟ ฝุ่นภูเขาไฟ (Valcanic Ash) เป็นต้น ซึ่งฝุ่นภูเขาไฟที่มีคุณภาพดีที่สุดพบใกล้ ๆ เมืองปอซโซลี่ (Pozzoli) ประเทศอิตาลี จึงเรียกฝุ่นนี้ว่า ปอซโซลาน่า หรือ ปอซโซลาน ถือเป็นที่มาของชื่อสารผสมแบบแร่ธาตุซึ่งต่อมาชื่อนี้ [2] ได้ใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนปอซโซลานที่มนุษย์ผลิตเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น Fly Ash เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน , ตะกรันเหล็ก (Blast Furnace Slag) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก , Silica Fume เป็นผลพลอยได้จากการผลิตซิลิกอน (Silicon) และเฟอร์โรซิลิกอน (Ferrosilicon) ดังนั้นการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นแล้วยังให้ประโยชน์ทางอ้อมในการกำจัดของเสีย ส่งผลดีเกี่ยวกับการขจัดปัญหาของมลภาวะและสิ่งแวดล้อม

การศึกษานี้มุ่งเน้นผลของซิลิกาฟูมที่มีผลต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตเหลวด้านความสามารถในการทำงานและคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้านกำลังอัดและคุณสมบัติระยะยาว

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

" ซิลิกาฟูม " เป็นสารปอซโซลานที่มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา(SiO_2) มีอนุภาคเล็กมากขนาดประมาณเท่าฝุ่น บางทีอาจเรียกว่า " ไมโครซิลิกา " หรือ "คอนเด็นซ์ซิลิกาฟูม " [3] ในทศวรรษ 1950 ประเทศแถบยุโรปได้เริ่มศึกษาการใช้ซิลิกาฟูมผสมในคอนกรีตซึ่งได้มีการพัฒนาและเริ่มนำไปใช้ในงานคอนกรีตอย่างจริงจังในปี 1969 [4]

ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์นั้นนอกจากจะได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นตัวอุดประสานเป็นส่วนสำคัญให้เกิดกำลัง ยังได้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดประโยชน์อันใดต่อคอนกรีตเลย การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ที่เวลาใด ๆ อาจจะเป็นการยากที่จะหาจากปริมาณของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้นตามเวลา เพราะโครงสร้างของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตค่อนข้างจะซับซ้อน แต่อีกทางหนึ่งอาจหาได้จากปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ในกรณีที่มีสารผสมปอซโซลานในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะสามารถใช้วิธีการนี้ไม่เพียงเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เวลาใดๆเท่านั้น แต่ยังสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลานได้ด้วย โดยพิจารณาจากปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงตามเวลาสืบเนื่องจากคัลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งคล้ายกับผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์

ในการหาปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นมีหลายวิธีเช่น วิธีแยกธาตุทางเคมี (Chemical Extraction) , วิธีแยกกลุ่มด้วยรังสีเอ็กซ์ (X - Ray Diffraction) , วิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อน (Thermal Analysis) ฯลฯ V. S. Ramachandran [5] ได้พบว่าวิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อน (Thermal Analysis) เป็นวิธีที่ใช้หาปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ถูกต้องที่สุด ส่วนวิธีการแยกธาตุทางเคมี (Chemical - Extraction) จะใช้หลักการของการวัดค่าคัลเซียมไอออนในสารละลายซึ่งปรากฏว่าให้ค่าปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์มากเกินไปด้วย สารเคมีเข้าไปละลายคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตบางส่วนให้เกิดคัลเซียมไอออนออกมาทำให้มีคัลเซียมไอออนในสารละลายมากกว่าปกติ ส่วนอีกวิธี การแยกกลุ่มด้วยรังสีเอ็กซ์ (X - Ray Diffraction) จะให้ค่าคัลเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำไป เนื่องจากวิธีนี้จะเก็บค่าคัลเซียมไฮดรอกไซด์เฉพาะที่เป็นผลึกเท่านั้น ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนที่เพิ่งรวมตัวกัน (Amorphous) หรือที่เป็นผลึกย่อย (Micro - crystalline) จะไม่มีการเก็บค่า H. G. Midgley [6] พบว่าวิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อน (Thermal Analysis) เป็นวิธีที่ใช้หาปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกต้องกว่าและให้ค่าเบี่ยงเบน

มาตรฐานของข้อมูลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีสองวิธีในข้างต้น โดยหลักการของวิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อนคือ การสลายตัวของมวลในแต่ละช่วงของอุณหภูมิจากการเผาที่อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่ง V.S. Ramachandran [5] พบว่าช่วงอุณหภูมิที่คัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์สลายตัวคือ 450 - 550°C และในทำนองเดียวกัน H.G. Midgley [6] พบว่าช่วงอุณหภูมิ 410 - 560°C คัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์สลายตัว อนึ่ง B.EL - Jazairi และ J.M. ILLston [7] พบว่าช่วงอุณหภูมิที่คัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์สลายตัวคือ 440 - 520°C

Min-Hong Zhang และ Odd E. Gjorv [8] ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมที่มีต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูมที่น้อยกว่า 0.4 โดยหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์เพสต์โดยวิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อน จากการทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่มีซิลิกาฟูมแทนที่ซีเมนต์ด้วยอัตรา 0, 8, 16 % โดยน้ำหนัก และกำหนดตัวแปรของน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูมในสัดส่วน 0.2, 0.3, 0.4 ตามลำดับ ผลการทดสอบปรากฏว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเริ่มเกิดตั้งแต่วันแรกไปจนถึง 550 วัน โดยเฉพาะในซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูม 16 % นั้นไม่ว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูมจะมีค่า 0.2, 0.3 หรือ 0.4 ที่ 550 วันจะไม่มีคัลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่เลย V. Yogendran , B.W. Langan และ M.A. Ward [9] ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ที่สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูม (w/(c+sf)) = 0.28 , 0.48 แล้วหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์โดยวิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อน (Thermal Analysis) ของซีเมนต์เพสต์ที่มีซิลิกาฟูมแทนที่ซีเมนต์ 0, 5, 10, 15, 20, 25 % พบว่าที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูม (w/(c+sf)) = 0.48 ด้วยการแทนที่ของซิลิกาฟูม 20 และ 25 % ไม่มีคัลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่เลยที่อายุ 180 วัน และที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูม (w/(c+sf)) = 0.28 โดยมีปริมาณซิลิกาฟูมแทนที่ 15 , 20 , 25 % จะไม่มีคัลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่เช่นกันที่อายุ 180 วัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูม 0.48 ด้วยปริมาณซิลิกาฟูม 20 % และที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูม (w/(c+sf)) = 0.28 ด้วยปริมาณซิลิกาฟูม 15 % จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูงที่สุดทั้งนี้จากผลของปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์สูงสุด

V. Yogendran , B.W. Langan และ M.A. Ward [10] ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมที่มีผลต่อคอนกรีตกำลังสูงด้วยสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูม (w/(c+sf)) 0.28 , 0.34 โดยมีปริมาณซิลิกาฟูมแทนที่ 5, 10, 15, 20, 25 % พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของซิลิกาฟูมที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดช่วง 50-70 Mpa ที่ 28 วันมีค่า 15 % และพบอีกว่าอิทธิพลของซิลิกาฟูมจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และลดค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ นอกจากนี้งานวิจัยของ ชยานนท์และคณะ [11] ได้ทำการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้สารลดปริมาณน้ำร่วมกับซิลิกาฟูม ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง จากการศึกษาโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 0.28 - 0.34 และอัตราการใช้ซิลิกาฟูม 8, 10, 12 %

ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าอัตราการใช้ซิลิกาฟูมเท่ากับ 12 % จะให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 904 กก. ต่อ ตร.ซม. ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และมีค่าความยุบตัว 10 ซม.

V. Novokshchenov [12] ได้ศึกษาตัวประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ใส่ซิลิกาฟูมดังนี้คือ การใช้ซีเมนต์ Type 1 , 2 จะให้กำลังอัดที่สูงกว่าใช้ซีเมนต์ Type 3 เนื่องมาจากที่ค่า Slump ค่าเดียวกันซีเมนต์ Type 3 ต้องการน้ำมากกว่าซีเมนต์ Type 1 , 2 เพราะฉะนั้นซีเมนต์ Type 1 , 2 จะมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่ากำลังอัดจึงสูงกว่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 504 - 620 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตโดยถ้าใส่ในปริมาณมากกว่านี้จะทำให้กำลังอัดลดลง ทั้งนี้ยังได้ศึกษาซิลิกาฟูมจากแหล่งผลิตที่ต่างกันจะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตด้วย โดยปริมาณที่เหมาะสมของซิลิกาฟูมคือ 20 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ นอกจากยังพบอีกว่าปริมาณทรายที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 653 - 890 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรหรือประมาณ 41 - 56 % โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด และได้ศึกษาผลกระทบของขนาดตัวอย่างทดสอบในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าขนาดของตัวอย่างทดสอบที่เหมาะสมที่สุดคือ ∅ 100 × 200 mm. ทรงกระบอกโดยมีกำลังอัดมากกว่าขนาด ∅ 150 × 300 mm. ไม่เกิน 3 % และยังพบอีกว่าการใช้น้ำยาลดน้ำอย่างมากในปริมาณที่เหมาะสมคือ 33 - 163 ลูกบาศก์เซ็นติเมตรต่อ 100 กิโลกรัมของซีเมนต์หรือ 3.3 - 16.3 % ถ้าใส่ในปริมาณที่มากกว่านี้จะทำให้กำลังอัดลดลงอาจเนื่องมาจากมีปริมาณอากาศในคอนกรีตมากเกินไป Marvin Sanvik และ Odd E. Gjorv [13] ได้ศึกษาผลของซิลิกาฟูมที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยแทนที่ซีเมนต์ที่ 0 , 5 , 10 , 20 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยไม่ใช้น้ำยาลดน้ำเลยที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูม 0.7 พบว่าปริมาณซิลิกาฟูมที่ 20 % จะให้กำลังอัดสูงสุดโดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 และ 90 วัน จะมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น 43 % และ 55 % ตามลำดับเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใส่ซิลิกาฟูม ซึ่งถึงแม้จะลดปริมาณซีเมนต์และใส่ซิลิกาฟูมแทนที่เข้าไปปรากฏว่าคอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูมก็ยังคงมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ใส่ในช่วง 7 วันแรกแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรก ๆ ซิลิกาฟูมได้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกแล้ว

Huang Cheng-Yi และ R.F. Feldman [14,15] ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมที่มีต่อมอร์ตาและซีเมนต์เพสต์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมบางส่วนจะแตกต่างกันเป็นผลมาจากอนุภาคของทรายซึ่งทำหน้าที่เป็นที่ยึดเกาะผลึกคัลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เมตริกซ์กับทรายด้วย และยังพบอีกว่าซิลิกาฟูมนอกจากจะช่วยปรับปรุงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์แล้วยังช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เมตริกซ์กับทรายด้วย M. Buil , A.M. Paillere และ B. Roussel [16] ได้พยายามหามอร์ตาที่มีสัดส่วนระหว่างทราย , ซีเมนต์ , ซิลิกาฟูมและน้ำยาลดน้ำพิเศษที่ให้กำลังอัดสูงที่สุด นอกจากนี้การใส่ซิลิกาฟูมในปริมาณมากจะต้องใส่น้ำยาลดน้ำพิเศษมากตามเพื่อให้มอร์ตามีความสามารถในการทำงานได้

คงที่และมีกำลังอัดที่สูงขึ้น จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนของซิลิกาฟูมต่อซีเมนต์ที่ 0.4 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำยาลดน้ำพิเศษต่อซีเมนต์ที่ 2.4 % โดยน้ำหนักจะให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด

โดยปกติการใส่สารปอซโซลานอีกประเภทหนึ่งคือ ขี้เถ้าลอย(Fly Ash)แทนที่ซีเมนต์จะมีกำลังอัดในระยะแรกต่ำกว่าการใช้ซีเมนต์ทั้งหมด แต่ในระยะยาวคอนกรีตที่ใส่ขี้เถ้าลอยจะให้กำลังอัดสูงกว่า ดังนั้นการปรับปรุงกำลังอัดในระยะแรกของคอนกรีตที่ใส่ขี้เถ้าลอยอาจพิจารณาใส่ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนซึ่ง G. Carette และ V.M. Malhotra [17] พบว่าการใส่ซิลิกาฟูมในคอนกรีตที่ใส่ขี้เถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงกำลังอัดในระยะแรกและไม่ทำให้กำลังอัดในระยะยาวเสียไปเนื่องจากซิลิกาฟูมไปแย่งทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับขี้เถ้าลอยด้วย M.Sandvik et. al. [18] ยังได้พบว่าคอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูมจะมีความเหนียว เนื้อคอนกรีตเกาะกันดีไม่เกิดการเยิ้มและการแยกตัวซึ่งมีผลดีกับการปั๊มคอนกรีตกล่าวคือ การใส่ซิลิกาฟูมเพียง 2 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์จะช่วยลดความดันในการปั๊มคอนกรีตได้ถึงประมาณ 15 ถึง 30 %

I. Meland [19] ได้ศึกษาอิทธิพลของวัสดุปอซโซลานต่ออัตราการเกิดความร้อนและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เพสต์ โดยใช้เครื่องมือวัดความร้อน (Isothermal Calorimeter) วัดความร้อนที่เกิดจากซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่โดยซิลิกาฟูม 0 , 10 , 20 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ แยกการทดสอบออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดแรกใส่สารเคมีผสมแบบ Lignosulphonate แบบหน่วงปฏิกิริยา และชุดที่ 2 ไม่ใส่สารเคมีผสมเพิ่มใด ๆ ผลการทดสอบปรากฏว่า ชุดที่ไม่ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใส่ซิลิกาฟูมจะมีปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากที่สุด ส่วนชุดที่ใส่สารเคมี Lignosulphonate ซีเมนต์เพสต์ที่มีซีเมนต์แทนที่โดยซิลิกาฟูม 10 % จะมีปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากที่สุด ส่วนอัตราการเกิดความร้อนซีเมนต์เพสต์จากทั้ง 2 ชุดที่ถูกแทนที่โดยซิลิกาฟูม 10 % ให้ค่าสูงที่สุดจึงสรุปได้ว่าซิลิกาฟูมจะช่วยลดอัตราการหน่วงของ Lignosulphonate ที่มีต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้และปริมาณซิลิกาฟุมที่เหมาะสมจะช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ด้วย M. I. Sanchez de Rojas , M.Frias [20] ได้ศึกษาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากมอร์ตาที่มีซีเมนต์แทนที่โดยซิลิกาฟูม 0 , 5 , 10 , 15 , 30 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ให้ผลการทดสอบพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 12 ชั่วโมงแรก โดยมอร์ตาที่มีซิลิกาฟูมแทนที่ 10 % จะเกิดความร้อนสูงสุด ซึ่งสรุปได้ว่าซิลิกาฟูมนั้นช่วยเพิ่มความร้อนได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกแต่สาเหตุที่ปริมาณความร้อนเมื่อซิลิกาฟูมแทนที่ 15% และ 30% มีความร้อนน้อยกว่าของที่มีซิลิกาฟูมแทนที่ 10 % เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์น้อยกว่าดังนั้นปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่าด้วยจึงทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยตาม Magne Maage [21] ได้ศึกษาอุณหภูมิการบ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูม 0 , 5 , 10 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ด้วยการบ่มที่อุณหภูมิ 5 , 20 และ 35 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าที่ซิลิกาฟูม 10 % บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศา

เซลเซียสจะให้กำลังอัดช่วงแรก (1-2 วัน) สูงกว่าที่อุณหภูมิบ่ม 20 และ 5 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมจะถูกเร่งโดยอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น อนึ่งอุณหภูมิบ่มที่ 5 องศาเซลเซียสจะไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเลยในช่วง 28 วันแรก ส่วนอุณหภูมิบ่มที่ 20 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวในช่วง 7 วันแรกและที่อุณหภูมิบ่มที่ 35 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในช่วง 2 วันแรก จากผลการทดสอบกำลังสรุปได้ว่าอุณหภูมิบ่มมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมมากกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์

J.C. Artigues, J.Curado, E. Iglesias [22] ได้ศึกษาการใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับน้ำยาลดน้ำเพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตด้านความทนทานและกำลังอัด การใส่ซิลิกาฟูมเข้าไป 10 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ นอกจากจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้นแล้วยังช่วยให้คอนกรีตต้านทานการเกิดคาร์บอเนชั่นและการซึมผ่านของน้ำด้วยโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ใส่ซิลิกาฟูม เขาได้อธิบายว่าเนื่องจากซิลิกาฟูมได้ทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นมาอุดช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นและการซึมผ่านของน้ำต่ำลง นอกจากนี้ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ก็ลดลงเนื่องจากได้ทำปฏิกิริยากับซิลิกาฟูมไปบางส่วนแล้วจึงเหลือปริมาณที่จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นคัลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดคาร์บอเนชั่นในปริมาณที่น้อยด้วย Perraton D. et. al. [23] ได้ศึกษาการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนซึ่งจะทำลายเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้เสียหายเร็วขึ้น จากการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ (Rapid Chloride Permeability Test) ตาม AASHTO T 277 พบว่า คอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูมนั้นจะมีปริมาณคลอไรด์ไอออนซึมผ่านน้อยกว่าโดยปริมาณของซิลิกาฟูมที่ 10 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ คลอไรด์ไอออนจะซึมผ่านใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 20 % แต่จะน้อยกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณซิลิกาฟูม 5 % Rasheeduzzafar et. al [24] ได้ทดสอบการต้านทานกัดกร่อนของซัลเฟตในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ Type 1 , คอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ Type 1 ใส่ซิลิกาฟูม , คอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ Type 5 ที่ต้านทานซัลเฟต ผลปรากฏว่า คอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ Type 1 ไม่ใส่ซิลิกาฟูมจะถูกกัดกร่อนมากที่สุด ส่วนคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ Type 1 ใส่ซิลิกาฟูมจะสามารถต้านทานซัลเฟตได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ Type 5 พิจารณาจากปริมาตรคอนกรีตที่ลดลงตามเวลา P.J. Svenkerud , P. Fidjestol , J.C. Artigues [25] ได้ทดสอบการต้านทานกัดกร่อนของซัลเฟตโดยจำลองสภาพแวดล้อมในห้องทดสอบให้ใกล้เคียงกับสภาพของการกัดกร่อนของซัลเฟตที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติตามข้อกำหนดใน CEB ให้ผลว่า คอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูมจะต้านทานซัลเฟตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใส่ โดยใส่ปริมาณซิลิกาฟูม 10 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์นั้นจะสามารถต้านทานซัลเฟตได้ใกล้เคียงกับการใส่ซิลิกาฟูม 20 %

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้จะพิจารณาผลกระทบของซิลิกาฟูมที่มีต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงด้วยการแทนที่ซีเมนต์กล่าวคือภายใต้ปริมาณของการทดแทน คอนกรีตสมรรถนะสูงยังจะต้องคงสภาพความสามารถเท โดยค่ายุบตัวเกินกว่า 20 ซม. มีการไหลแผ่มากกว่า 50 ซม. มีกำลังอัดรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เกินกว่า 600 กก. ต่อตร.ซม. และกำลังอัดที่ 1 วัน สูงกว่า 300 กก. ต่อตร.ซม. โดยมีวัตถุประสงค์คือ

1. ศึกษาปริมาณของซิลิกาฟูมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเหลวตามสัดส่วนการผสมตามที่ออกแบบ
2. ศึกษาปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตที่ผสมด้วยซิลิกาฟูม
3. วิเคราะห์หาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก
4. ศึกษาผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมตามปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก
5. ศึกษาคุณสมบัติการหดตัวของมอร์ตาและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูม

การศึกษาวิจัยนี้มีขอบเขตที่

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา แบบที่ 1 (ASTM C-150 Type 1)
2. สารเพิ่มความไหลลื่นพิเศษ (Superplasticizer) (ASTM C-494 Type G)
3. ซิลิกาฟูมตาม ASTM C 1240 มีขนาดระหว่าง 0.01 ถึง 0.50 ไมครอน
4. มวลรวมเป็นหินปูนขนาดใหญ่สุด 1/2 " จากแหล่งหินสระบุรีและใช้ทรายแม่น้ำจากกาญจนบุรี

1.4 การดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อกำหนดขอบข่ายและแนวทางในการทดสอบวิจัย
2. หาคุณสมบัติพื้นฐานและวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม ซีเมนต์และสารเคมีผสม
3. ทดสอบขนาดคละของมวลรวมหินทราย ทดสอบคุณสมบัติมวลรวมตามมาตรฐาน มอก. และ ASTM Standard
4. ออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยใช้ซิลิกาฟูมเป็นตัวแปรหลัก และใช้สารลดปริมาณน้ำอย่างมากเป็นตัวปรับแต่งคุณสมบัติหลักของคอนกรีตสด

5. ทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดอันได้แก่ค่าการยุบตัวและค่าการไหลแผ่
6. ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้ก้อนตัวอย่างทรงกระบอกขนาด $\varnothing$ 10 × 20 ซม. ที่อายุต่าง ๆ กัน นำผลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าตัวแปรต่าง ๆ จากการทดสอบ
7. ทดสอบหาค่าปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมโดยวิธี Thermogravimetry Analysis (TGA) เปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูม ซีเมนต์เพสต์ธรรมดา
8. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ TGA เพื่อคำนวณหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมา เปรียบเทียบกับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกำลังอัดและความคงทนโดยเทียบกับเวลา

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปริมาณของซิลิกาฟูมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งที่เกี่ยวกับความสามารถเทได้และด้านกำลังอัด
2. ทราบถึงปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ที่มีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากผลของปริมาณซิลิกาฟูม
3. ทราบถึงปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้น ตามปริมาณซีเมนต์และปริมาณซิลิกาฟูมในส่วนผสม