บทที่ 1

บทนำ

1.1 ทั่วไป

โดยทั่วไป ส่วนผสมของคอนกรีตจะประกอบด้วย มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด วัสดุผงและน้ำ ซึ่งวัสดุผงหลักที่ใช้ในงานคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ แต่ในปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุผงชนิดอื่น ๆ เช่น เถ้าลอย ผงซิลิกา ฝุ่นหินปูน เป็นต้น มาใช้ในงานคอนกรีตมากขึ้น โดยจะเป็นการใส่แทนที่ซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งการนำวัสดุผงอื่น ๆ ดังกล่าวนี้มาใช้มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุผงเหล่านี้จัดได้ว่าเป็นผลพลอยได้หรือของเสียจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ การนำมาใช้จึงทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุผสมและช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

การศึกษาวิจัยถึงผลของการนำวัสดุผงเหล่านี้มาใช้ในงานคอนกรีตจึงมีมากขึ้น แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปจากคอนกรีตธรรมดาทั้งในสภาวะเหลวและสภาวะแข็งตัวแล้ว เช่น ค่าการยุบตัว กำลังรับแรงอัด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผสมคอนกรีตยังมีน้อยมาก ทั้ง ๆ ที่กระบวนการผสมคอนกรีตถือเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของคอนกรีตที่ได้ โดยกระบวนการผสมคอนกรีตที่ใช้ในปัจจุบันนั้นยังใช้กระบวนการเดียวกันกับการผสมคอนกรีตธรรมดา กล่าวคือจะสิ้นสุดการผสมที่การเป็นเนื้อเดียวกันหรือมักใช้ระยะเวลาการผสมเป็นดัชนีในการควบคุมการผสมซึ่งเป็นการไม่เหมาะสม เนื่องจากระยะเวลาที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีตจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของวัสดุผสม การออกแบบส่วนผสม ปริมาณการผสมรวมไปถึงชนิดของเครื่องผสมที่ใช้ ดังนั้น ไม่ว่าปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตจะถูกออกแบบมาอย่างดีเพียงใด หรือจะเลือกใช้วัสดุผสมที่มีคุณภาพสูงก็ตาม แต่หากกระบวนการผสมที่ใช้ยังไม่เหมาะสม คุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้ก็อาจจะไม่ตรงตามต้องการ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า คุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดาทั้งในสภาวะเหลวและแข็งตัวจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความเข้มของการผสมซึ่งเป็นผลรวมของเวลาและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมและที่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะทำให้ส่วนผสมมีการกระจายตัวอย่างเหมาะสม นอกจากนี้ ปัจจุบันได้มีการนำสารลดน้ำอย่างมากมาใช้ในงานคอนกรีตที่มีวัสดุผงต่าง ๆ เหล่านี้มากขึ้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ซึ่งพบว่า สารลดน้ำอย่างมากมีผลทำให้พลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อวัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กันยังไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงกระบวนการผสมคอนกรีตที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก โดยใช้ค่าระดับความเข้มของการผสมเป็นดัชนีในการศึกษา รวมไปถึงศึกษาคุณสมบัติของส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าระดับความเข้มของการผสม เพื่ออธิบายกลไกการผสมและผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณสมบัติของส่วนผสม เมื่อชนิดของวัสดุผงเปลี่ยนแปลงไป

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

โดยหลักการผสมคอนกรีตที่ดี จะเป็นการกระจายอนุภาคของซีเมนต์ด้วยพลังงานกลจากเครื่องผสมให้ไปเคลือบผิวมวลรวมจนทั่ว โดยที่ผิวของอนุภาคซีเมนต์นั้นจะต้องถูกล้อมรอบด้วยน้ำอีกทีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่สมบูรณ์ การที่จะทำให้อนุภาคซีเมนต์เกิดการกระจายตัวที่ดีได้ดังกล่าว กระบวนการผสมคอนกรีตจัดได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีบทบาทที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาเป็นลำดับแรก ๆ กระบวนการผสมที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ส่วนผสมที่ได้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปด้วย

ในอดีตที่ผ่านมา ได้มีนักวิจัยหลายท่านที่สนใจศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงกระบวนการผสมคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น Roy และ Asaga[1] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของกระบวนการผสมที่แตกต่างกัน 9 กระบวนการต่อคุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์เพสต์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงกระบวนการผสมจะทำให้ส่วนผสมมีรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนไปทั้งส่วนผสมที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำ โดยจะส่งผลกระทบต่อหน่วยแรงเฉือนคลากของส่วนผสมมากกว่าความหนืดแบบพลาสติก ในกรณีของกระบวนการผสม 2 กระบวนการที่แตกต่างกันมากที่สุด พบว่า หน่วยแรงเฉือนคลากและความหนืดแบบพลาสติกมีค่าแตกต่างกันถึง 60%

Soga และคณะ[2] ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสดที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดเครื่องผสม จำนวนรอบของเครื่องผสม ขั้นตอนการผสมและเวลาในการผสม สรุปได้ว่า สามารถจะประเมินคุณภาพของคอนกรีตสดได้จากพลังงานที่ใช้ในการผสมซึ่งขึ้นกับระยะเวลาการผสมและลักษณะการหมุนของเครื่องผสม และปริมาณฟองอากาศสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานการผสมอยู่ในช่วง 0.5 – 0.8 Wh/l ดังรูปที่ 1.1

Kakizaki และคณะ[3] ทำการศึกษาโดยเปลี่ยนระยะเวลาในการผสมและขั้นตอนการผสมต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมเพิ่ม พบว่าค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการผสม เนื่องจากอนุภาควัสดุผงมีการกระจายตัวดีขึ้นจนทำให้ขนาดช่องว่างภายในเล็กลง

จากการศึกษาของ Rejeb[4] ซึ่งได้ทำการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้กระบวนการผสม 2 ขั้นตอนกล่าวคือ ทำการผสมซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ก่อนเป็นเวลา 2 นาทีแล้วจึงผสมส่วนผสมที่เหลืออีก 2 นาที การผสมแบบนี้ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วันมีค่าสูงขึ้น 8-17% เมื่อเทียบกับการผสมแบบปกติที่ใช้เวลา 3 นาที กำลังอัดที่สูงขึ้นเกิดจากอนุภาคซีเมนต์มีพื้นผิวสัมผัสกับน้ำมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมากขึ้น

1.2.2 ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต

นอกจากกระบวนการผสมที่เปลี่ยนไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตแตกต่างกันแล้ว คุณสมบัติของวัสดุผงที่ใช้เป็นวัสดุผสมของคอนกรีตก็มีบทบาทสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้โดยเฉพาะคุณสมบัติทางด้านความสามารถทำงานได้

จากการศึกษาของ Berg[5] พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและสัดส่วนปริมาตรของซีเมนต์ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการวัดอยู่ในรูปของหน่วยแรงเฉือนคลาก โดยใช้ซีเมนต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะในช่วง

1300-6900 cm^2/g และค่าสัดส่วนปริมาตรซีเมนต์ต่อปริมาตรทั้งหมดในช่วง 0.29-0.44 ทำการผสมแบบเดียวกัน ได้ผลดังรูปที่ 1.2 ซึ่งสรุปว่า ซีเมนต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าหรือละเอียดกว่าจะไหลได้ยากกว่าที่สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์ต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดเท่ากัน และที่ความละเอียดเท่ากัน สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์ต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดที่มากกว่าจะได้ค่าหน่วยแรงเฉือนมากกว่าหรือไหลได้ยากกว่า

Hanke[6] ศึกษาถึงปัจจัยสำคัญต่อการทำนายความข้นเหลวของคอนกรีตที่วัดจากค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตบนโต๊ะการไหล พบว่าปัจจัยที่สำคัญคือ ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณของวัสดุผงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.25 มม. ขนาดคละของมวลรวม ขนาดคละของวัสดุผงและอัตราการทำปฏิกิริยาของซีเมนต์ สำหรับการใส่วัสดุผงขนาดเล็กในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการไหลลดลง ในรูปที่ 1.3 ศึกษาผลของซีเมนต์เพสต์ต่อค่าการไหลของคอนกรีตที่มีขนาดคละของมวลรวมและปริมาณน้ำเท่ากัน พบว่า เมื่อคอนกรีตมีปริมาณเพสต์มากขึ้นจะช่วยเพิ่มค่าการไหลได้

Logos และ Nguyen[7] พบว่าขนาดอนุภาคของวัสดุผงมีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านการไหลของเพสต์ โดยใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุผงหลักที่มีขนาดคละแตกต่างกัน 3 แบบ คือ ขนาดละเอียด(เล็กกว่า 45μm) ขนาดปานกลาง(208-279μm) และขนาดใหญ่(279-325μm) ได้ผลดังรูปที่ 1.4 ซึ่งสรุปได้ว่า เมื่อใส่เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ลงแทนที่ขนาดละเอียดจะช่วยลดค่าความหนืดของเพสต์ลงได้ โดยจะมีสัดส่วนที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่งซึ่งทำให้ค่าความหนืดมีค่าที่ต่ำที่สุด

Hopkins และ Cabrera[8] ศึกษาผลของรูปร่างของเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต พบว่า รูปร่างที่กลมและลักษณะพื้นผิวที่เรียบของเถ้าถ่านหินจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านการไหลให้ดีขึ้นได้ โดยเสนอค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างขึ้นใหม่ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่คำนวณจากขนาดคละกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่วัดโดยวิธี Fisher Sub Sieve Sizer ค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างนี้สามารถใช้เป็นดัชนีเพื่อแยกแยะประเภทของเถ้าถ่านหินได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าการไหลของคอนกรีตที่แตกต่างกันด้วย

Krstulovic และคณะ[9] เสนอแนวทางในการพิจารณาถึงผลของวัสดุผงขนาดเล็กต่อความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์และคอนกรีต พบว่า วัสดุผงขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ได้จึงมีผลให้ความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์และคอนกรีตดีขึ้น โดยให้ผลที่ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อวัสดุผงมีขนาดเล็กลง

Gallias[10] ศึกษาผลของคุณสมบัติวัสดุผงต่อความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์ในกรณีที่ไม่ใส่สารลดน้ำและกำหนดให้มีความสามารถทำงานได้เหมือนกัน พบว่าความต้องการน้ำของเพสต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและมีความละเอียดมากขึ้น

Kitticharoenkiat[11] ได้เสนอแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าการยุบตัวคือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์กับปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม ปริมาณน้ำอิสระ พื้นที่ผิวของมวลรวมและซีเมนต์ นอกจากนี้ได้เสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์เริ่มมีค่าการยุบตัว

Khunthongkaew[12] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองของ Kitticharoenkiat[11] โดยพิจารณาถึงผลคุณสมบัติของวัสดุผงชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติมรวมทั้งสารลดน้ำอย่างมากต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด โดยคุณสมบัติของวัสดุ

ผงที่มีผลต่อค่าการขุบตัวของคอนกรีตประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะ รูปร่างและสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับลักษณะการแยกขนาด

1.2.3 ผลของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

ปัจจุบัน ประเทศไทยมีการนำเถ้าลอยมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตมากขึ้น การใส่เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์จะช่วยลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้จึงเหมาะกับงานคอนกรีตหลาหรืองานที่ต้องเทคอนกรีตในปริมาณมาก นอกจากนี้เถ้าลอยยังช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ดีขึ้นและมีความทนทานมากขึ้น[13,14]

การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาจึงเป็นการศึกษาถึงผลของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดย สมชัย[15] ศึกษาถึงการนำเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้ในงานคอนกรีตบดอัด พบว่า อนุภาคของเถ้าลอยที่เป็นทรงกลมสามารถช่วยให้การคลุกเคล้าและบดอัดคอนกรีตสดดำเนินไปได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังไม่มีปัญหาเรื่องการแตกร้าวจากผลของความร้อนในระยะก่อตัวของซีเมนต์และไม่มีปัญหาเรื่องการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำอีกด้วย

กรกฎ[16] พบว่าการใช้เถ้าลอยจากแม่เมาะสามารถปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด โดยการใส่เถ้าลอยทุก ๆ 10% โดยน้ำหนักซีเมนต์จะสามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงได้ 0.03 นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตสดได้ 0.1% เมื่อใส่เถ้าลอยทุก 15% โดยน้ำหนักซีเมนต์

วิศว[17] พบว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดขึ้นจากทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมากกว่า กล่าวคือ ประมาณ 5% ที่อายุ 28 วันและมากกว่า 10% ที่อายุ 56 วัน โดยปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยมีอายุประมาณ 2 สัปดาห์ นอกจากนี้ยังสรุปว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ซีเมนต์ควรอยู่ระหว่าง 15-25% และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 0.26-0.32

เนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอโดยมีขนาดตั้งแต่ 1 ไมครอนถึงมากกว่า 1 มิลลิเมตร จึงมีการศึกษาถึงผลของเถ้าลอยที่แยกขนาดต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติของคอนกรีต จากการศึกษาของชัยและคณะ[18,19] ซึ่งได้นำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแยกขนาดด้วยเครื่อง Air Classifier แล้วเลือกเถ้าลอยความละเอียดสูงที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมครอนหรือพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 14671 cm^2/g มาแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนัก พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไปและมีค่าเป็นร้อยละ 113 ถึง 115 ของคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอยที่อายุ 365 วัน ดังรูปที่ 1.5 แสดงว่าเถ้าลอยที่ละเอียดสูงช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในระยะแรกได้ดีและความต้องการใช้น้ำของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใส่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น

Peris-Mora และคณะ[20] นำเถ้าลอย 4 ขนาดมาแทนที่ซีเมนต์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าการไหลของมอร์ตาร์โดยใช้โต๊ะการไหล พบว่า ค่าการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น

Erdogdu และ Turker[21] ศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าลอย 2 ชนิดที่มีขนาดต่าง ๆ ต่อค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยที่แยกเฉพาะขนาดที่ละเอียดกว่าจะมีค่ากำลังอัดในระยะแรกที่สูงกว่า เนื่อง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ

จากเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เร็วกว่า โดยเปรียบเทียบสำหรับการใช้เถ้าลอยชนิดเดียวกันและจะเห็นผลชัดเจนเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 45μm อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียว พบว่า กำลังอัดในระยะยาวมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยที่มีขนาดคละตามปกติ

Slanicka[22] ศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าลอยต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบทางเคมีใกล้เคียงกันแต่มีความละเอียดที่ต่างกัน กล่าวคือ ขนาดใหญ่ (2208 cm^2/g) และขนาดละเอียด (5327 cm^2/g) จากผลการทดลองพบว่า เถ้าลอยขนาดละเอียดช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นในขณะที่เถ้าลอยขนาดใหญ่ทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำมากขึ้น ทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง นอกจากนี้ได้เสนอสมการที่ใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ละขนาดจากการปรับปรุงสมการของ Abrams และ Bolomey

จากการศึกษาของ Raask และ Bhaskar[23] พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยสูงขึ้น และดัชนีของปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเป็นแปรผันตรงกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะยกกำลังสอง โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะทดสอบด้วยวิธี Nitrogen Adsorption อย่างไรก็ตาม สำหรับเถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนหลงเหลืออยู่มาก ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะไม่สามารถใช้ทำนายอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนจะทำให้ทดสอบได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แต่ไม่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก

จากการศึกษาของ Ravina[24] พบว่า ดัชนีของปฏิกิริยาปอซโซลานิกแปรผันตรงกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะยกกำลังสอง ดังรูปที่ 1.6 โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะทดสอบโดยวิธีการซึมผ่านของอากาศ แต่จะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณที่ค้างบนตะแกรงขนาด 45μm

1.2.4 ผลของฝุ่นหินปูนต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

การศึกษาถึงการนำฝุ่นหินปูนมาใช้เป็นวัสดุผงเพิ่มนั้นยังมีไม่มากนัก และจะเป็นการศึกษาเพียงคุณสมบัติของคอนกรีตที่เปลี่ยนไปเมื่อใส่ฝุ่นหินปูนในปริมาณต่าง ๆ จากการศึกษาของ Malhotra และ Carette[25] พบว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายของฝุ่นหินปูนมากกว่า 10% จะมีการลดลงของปริมาณฟองอากาศและค่าการยุบตัว ทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เมื่อใส่ฝุ่นหินปูนจะเพิ่มค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้เมื่อส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ต่ำ ๆ

สมนึกและคณะ[26] ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินปูนจาก 3 แหล่งที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 4520, 2620 และ 2670 cm^2/g ตามลำดับ แทนที่ซีเมนต์เป็นจำนวนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสดและแข็งตัว พบว่า ฝุ่นหินปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์จะทำให้ความข้นเหลวปกติต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา แต่ฝุ่นหินปูนชนิดที่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์จะทำให้ความข้นเหลวปกติมีค่าสูงขึ้น ฝุ่นหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าซีเมนต์จะช่วยให้ซีเมนต์กระจายตัวดีขึ้น เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเร็วขึ้นจึงช่วยลดระยะเวลาการก่อตัวได้ สำหรับคุณสมบัติด้านความทนทาน

Sawicz และ Heng[27] ศึกษาผลกระทบของฝุ่นหินปูนและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อความต้านทานการกัดกร่อนโดยซัลเฟต พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 0.6 การใส่ฝุ่นหินปูนจะป้องกันการเปลี่ยนรูปของ Ettringite ไปเป็นซัลโฟอลูมิเนท ลดความพรุนและทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น

1.2.5 ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

ปัจจุบัน มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะสารลดน้ำอย่างมาก (High Range Water-Reducing Admixture, HRWRA) ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความสามารถเทได้สำหรับงานคอนกรีตไหล (คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวมากกว่า 25 cm)และด้านกำลังของคอนกรีต เริ่มแรกสารลดน้ำอย่างมากนี้ถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตเป็นจำนวนมากที่ประเทศญี่ปุ่นประมาณปลายทศวรรษที่ 1960 ภายหลังจากนั้นสารลดน้ำอย่างมากก็ได้รับความนิยมนำไปใช้งานกันในหลายประเทศทั่วโลก โดยกลไกการทำงานของสารลดน้ำอย่างมากนั้นจะเหมือนกับการทำงานของสารลดน้ำธรรมดาแต่แตกต่างกันตรงที่สารลดน้ำอย่างมากจะมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าและเมื่อละลายน้ำแล้วแตกตัวได้ประจุลบที่มีค่าประจุสูงมาก โดยประจุลบนี้จะดูดติดกับผิวของซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1.7[28] ในปี ค.ศ. 1976 สมาคม CAA/C&CA (Cement and Concrete Association/ Cement Admixtures Association) ได้แบ่งสารลดน้ำอย่างมากออกเป็น 4 ชนิดตามลักษณะโครงสร้างและสารประกอบทางเคมี ดังนี้

ก. สารลดน้ำอย่างมากชนิดที่มีเกลือซัลโฟเนทเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (Sulfonated Melamine Formaldehyde Condensate, HR-M) โดยมีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 1.8ก. สารลดน้ำอย่างมากชนิดนี้จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 20,000 ค่า n ในรูปจะเป็นค่าตัวเลขคอนเดนเซชั่น ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 50-60 สารลดน้ำอย่างมากชนิดนี้จะทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถเทได้มากและรวดเร็วกว่าชนิดอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามมีข้อดีที่สามารถลดน้ำได้มากกว่าสารลดน้ำอย่างมากชนิดอื่น ๆ จึงเหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงในระยะแรกและทำงานที่อุณหภูมิไม่สูงนัก

ข. สารลดน้ำอย่างมากชนิดที่มีเกลือซัลโฟเนทแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (Sulfonated Napthalene Formaldehyde Condensate, HR-N) โดยมีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 1.8ข. สารลดน้ำอย่างมากชนิดนี้จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าสารลดน้ำอย่างมากชนิดเมลาลีนคือมีค่าประมาณ 2,000 และมีค่า n ซึ่งเป็นค่าตัวเลขคอนเดนเซชั่นอยู่ในช่วง 5-10 สารลดน้ำอย่างมากชนิดนี้จะทำให้เกิดการหน่วงการก่อตัวและมีปริมาณฟองอากาศที่มากกว่าสารลดน้ำอย่างมากชนิดเมลามีน เหมาะกับงานคอนกรีตหล่อสำเร็จซึ่งทำงานที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 15-40°C และเหมาะกับงานคอนกรีตหลาที่มีปริมาณเหล็กเสริมมากซึ่งต้องการคอนกรีตที่ไหลได้และไม่ก่อตัวเร็วจนเกินไป

ค. สารลดน้ำอย่างมากชนิดโมดิฟายลิกโนซัลโฟเนท (Modified Lignosulphonates) สารลดน้ำอย่างมากชนิดนี้ได้มาจากเยื่อไม้ซึ่งจะผ่านกระบวนการคัดเอาพวกน้ำตาลและสารปนเปื้อนอื่น ๆ ออกโครงสร้างของสารลดน้ำอย่างมากชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 1.8ค. สารลดน้ำอย่างมากชนิดนี้ทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถเทได้ต่ำที่สุด นั่นคือทำให้เกิดการหน่วงการก่อตัวมากที่สุดด้วย จึงเหมาะกับงานคอนกรีตในอากาศร้อนและบริเวณที่หล่อคอนกรีตกับโรงงานผสมอยู่ห่างไกล อีกทั้งยังเหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องการความสามารถเทได้สูง ๆ แต่คุณภาพของมวลรวมไม่ดีซึ่งอาจทำให้เกิดการเยิ้มที่มากเกินไปหรืออาจเกิดการแยกตัวได้

ง. สารเคมีอื่น ๆ ที่สามารถทำหน้าที่เป็นสารลดน้ำอย่างมากได้ เช่น สารผสมระหว่างกรดพวกเอไมด์กับโพลีแซคคาไรด์ (Acid amide/polysaccharide mixture) หรือโพลีเมอร์ที่มีกลุ่มไฮดรอกซิลและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ

สารลดน้ำอย่างมากแต่ละชนิดจะส่งผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสมแตกต่างกัน รูปที่ 1.9 แสดงถึงผลของสารลดน้ำอย่างมากชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งพบว่าสารลดน้ำอย่างมากชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีค่าการไหลที่มากกว่า อย่างไรก็ตามการใส่สารลดน้ำอย่างมากที่มากเกินไปก็จะทำให้ค่าการไหลมีค่าลดลง

จากการศึกษาของ Mayer[29] และ Dodson[30] ซึ่งได้ศึกษาการทำงานของสารลดน้ำอย่างมากที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นซัลโฟเนทเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท และซัลโฟเนทแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท พบว่า สารลดน้ำอย่างมากทั้ง 2 ชนิดนี้ มีผลทำให้เกิดประจุลบบนผิวอนุภาคซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคขึ้น ซึ่งป้องกันการเกาะตัวของอนุภาคซีเมนต์ และจะเกิดฟิล์มบางเคลือบผิวอนุภาคจึงช่วยให้เกิดความหล่อลื่นระหว่างอนุภาค

เนื่องจากสารลดน้ำอย่างมากทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคซีเมนต์ ดังนั้นค่าความหนืดและหน่วยแรงคลากจะมีค่าลดลง Hattori[31] สรุปว่า ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดลดลงแต่เมื่อปริมาณสารลดน้ำอย่างมากถึงปริมาณอิ่มตัวบนอนุภาคซีเมนต์แล้ว ค่าความหนืดจะมีค่าต่ำสุดและคงที่ โดยการเติมปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่มากกว่านี้ก็ไม่ทำให้ค่าความหนืดลดลงอีก

Eriksen และ Nepper-Christensen[32] ทำการศึกษาผลของสารลดน้ำอย่างมากที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นซัลโฟเนทแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทต่อคอนกรีตที่ใส่เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ 2 ชนิด พบว่าคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากจะมีการกระจายตัวของส่วนผสมที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก

Brooks และคณะ[33] สรุปว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยหรือคอนกรีตธรรมดาที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากจะมีกำลังอัดที่อายุ 1 วันและ 28 วันสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยหรือคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากที่มีสัดส่วนการผสมเหมือนกัน

อย่างไรก็ตาม Stuart และคณะ[34] พบว่า การใส่เถ้าลอยแทนที่ปริมาณซีเมนต์ไม่ได้เปลี่ยนปริมาณที่เหมาะสมของการใส่สารลดน้ำอย่างมาก ถ้าปริมาณการใส่สารลดน้ำอย่างมากนั้นขึ้นกับน้ำหนักของซีเมนต์

1.2.6 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

จากการศึกษาของ Stitmannaithum[35] ได้รวมผลของเวลาในการผสมและพลังงานการผสมที่ขึ้นกับความเร็วของเครื่องผสม ชนิดเครื่องผสมซึ่งเป็นเครื่องผสมประเภท Force Type และสัดส่วนการผสม เสนอเป็นค่าระดับความเข้มของการผสม (Mixing Intensity, E_{in}) และพบว่า คุณสมบัติของคอนกรีตจะขึ้นกับค่าระดับความเข้มของการผสมและที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวสูงที่สุด จากการทดลองค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะขึ้นกับสัดส่วนปริมาตรวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด (n_c) เป็นหลัก โดยไม่ขึ้นกับปริมาณการผสมและชนิดของเครื่องผสม พิจารณารูปที่ 1.10 แบบจำลองในการทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ คือ $E_{in} = 7.38n_c$ ในขณะที่คอนกรีต

แบบจำลองจะอยู่ในรูป $E_{in} = 5.91n_c$ ทั้งนี้เป็นเพราะผลจากการเคลื่อนที่ของหินที่จะช่วยกระจายอนุภาคของซีเมนต์ได้อีกทางหนึ่ง

นิพนธ์[36] ได้ทำการศึกษาผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อค่าพลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ พบว่า เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมากจะทำให้ค่าพลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าลดลง เนื่องจากสารลดน้ำอย่างมากมีคุณสมบัติในการช่วยลดรอยต่อระหว่างอนุภาคซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลให้ต้องการพลังงานเพื่อกระจายอนุภาคลดลง นอกจากนี้สารลดน้ำอย่างมากยังมีส่วนช่วยหล่อลื่นซึ่งขึ้นกับระยะห่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด

สุดารัตน์[37] ทำการศึกษาผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตที่ใช้เครื่องผสมที่มีความจุตั้งแต่ 0.7 – 2 ลบ.ม. และใช้เครื่องผสมทั้งชนิด Pan Type และ Drum Type พบว่า สำหรับคอนกรีตปกติระดับความเข้มของการผสมที่เปลี่ยนไปส่งผลชัดเจนต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต แต่สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มระดับความเข้มของการผสมที่เปลี่ยนไปจะส่งผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อยลงมาก โดยแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะใช้ได้ดีกับเครื่องผสมแบบ Pan Type

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์หลักดังนี้

1.3.1 ศึกษาผลของคุณสมบัติของวัสดุผงที่เกี่ยวกับความละเอียดและลักษณะรูปร่างต่อพลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในการผสมเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต

1.3.2 สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจากผลของคุณสมบัติของวัสดุผงสำหรับเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต

1.3.3 ศึกษาผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้อยู่ภายใต้ขอบเขตดังนี้

1.4.1 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15-2532 หรือ ASTM C150-92

1.4.2 ใช้ปูนซีเมนต์ผสมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 80-2517

1.4.3 ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง โดยจัดประเภทของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-93 และแยกขนาดเถ้าลอยโดยใช้เครื่อง Air Classifier

1.4.4 ใช้สารลดน้ำอย่างมากตามมาตรฐาน มอก. 733-2530 หรือ ASTM-C494 ชนิด F ที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท

1.4.5 ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33-92a

1.4.6 หินที่ใช้เป็นหินปูนย่อย มีขนาดโตสุดเท่ากับ ¾ นิ้ว และขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33-92a

1.4.7 เครื่องผสมที่ใช้ผสมทั้งซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต เป็นเครื่องผสมที่ให้พลังงานกลกับใบพายในการผสมส่วนผสม

1.5 การดำเนินการวิจัย

วัสดุผงที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นวัสดุผงที่ใช้ในงานคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีสารประกอบจำพวกแร่ธาตุทั้งนี้ไม่รวมวัสดุผงที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ โดยแบ่งวัสดุผงออกเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งประกอบด้วย วัสดุผงในกลุ่มของซีเมนต์ วัสดุผงที่ใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและวัสดุผงที่ใช้ซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูน

งานวิจัยครั้งนี้จะมุ่งศึกษาถึงผลของคุณสมบัติวัสดุผงที่เกี่ยวกับความละเอียดและลักษณะรูปร่างที่มีต่อพลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก โดยแบ่งการดำเนินงานเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1.5.1 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผงและมวลรวม

วัสดุผงที่ใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานจะใช้วัสดุผงเพียงชนิดเดียวทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ปูนซีเมนต์ผสม เถ้าลอยขนาดดั้งเดิม เถ้าลอยแยกขนาด 2 ขนาดและฝุ่นหินปูน โดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติดังนี้

1.5.1.1 ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188

1.5.1.2 ทดสอบหาความละเอียดโดยหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลนตามมาตรฐาน ASTM C204

1.5.1.3 ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมที่ได้จากค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคและเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจากกล้องกำลังขยายสูง

สำหรับมวลรวมที่ใช้ คือ ทรายแม่น้ำและหินปูนย่อย ทำการทดสอบหาคุณสมบัติดังนี้

1.5.1.4 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ โดยใช้มาตรฐาน ASTM C128 สำหรับทรายแม่น้ำและ ASTM C127 สำหรับหินปูน

1.5.1.5 ทดสอบหาขนาดคละ โดยใช้มาตรฐาน ASTM C136

1.5.2 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

วัสดุผงที่ใช้ในการทดลองจะเป็นวัสดุผงเพียงชนิดเดียวทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ปูนซีเมนต์ผสม เถ้าลอยขนาดดั้งเดิม เถ้าลอยแยกขนาด 2 ขนาด ฝุ่นหินปูนและผงซิลิกา โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1.5.2.1 ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยใช้วิธีหาค่าการยุบตัวขนาดเล็กซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำจะเป็นค่าปริมาณน้ำมากสุดที่ทำให้ค่าการยุบตัวเป็นศูนย์

1.5.2.2 สร้างแบบจำลองทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงทั้งหมด

1.5.2.3 ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงเมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาก

1.5.2.4 สร้างแบบจำลองทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงเมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาก

1.5.3 การทดลองหาค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต โดยในแต่ละกรณีจะแบ่งเป็นส่วนผสมที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

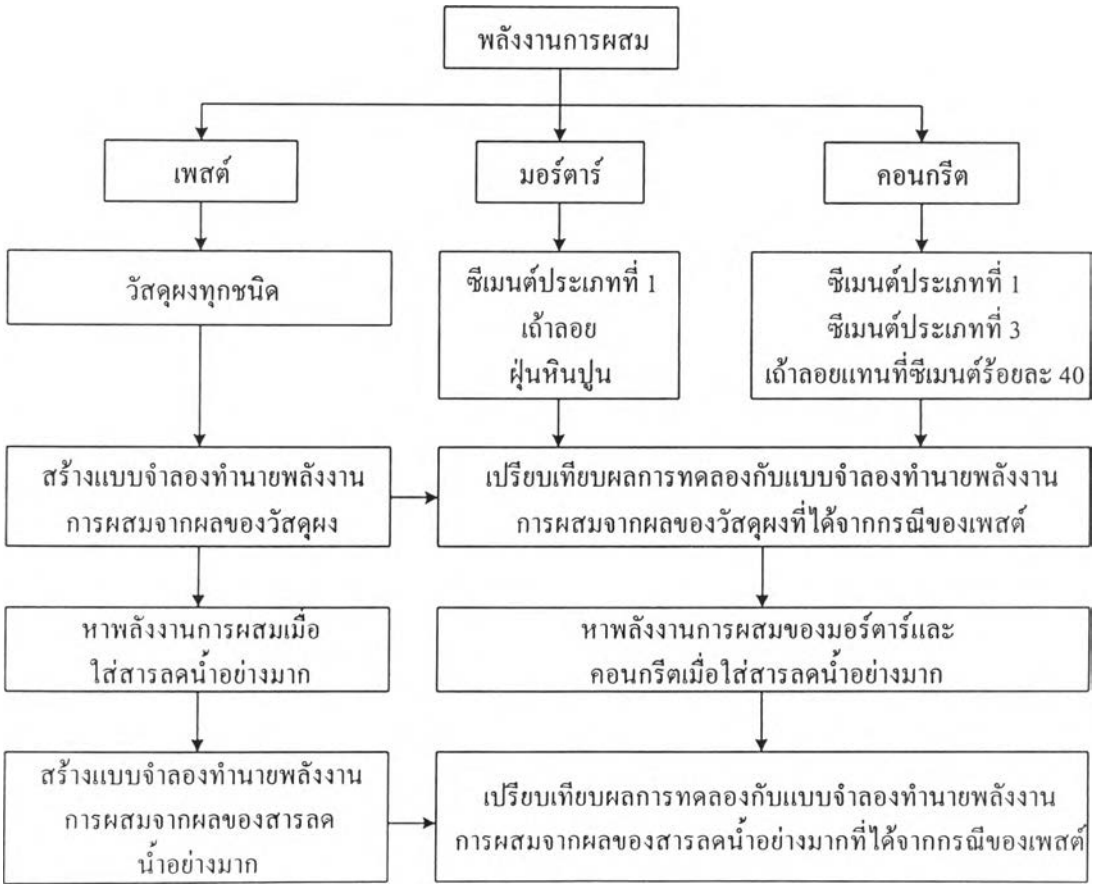
1.5.3.1 ทำการทดลองหาพลังงานการผสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงแต่ละชนิดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่าง ๆ ทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก

1.5.3.2 สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายพลังงานการผสมของเพสต์ตามคุณสมบัติของวัสดุผงที่ใช้ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่าง ๆ ทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก

1.5.3.3 ในกรณีของมอร์ตาร์ เลือกใช้วัสดุผงเพียงซีเมนต์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ทำการทดลองและทำนายพลังงานการผสมมอร์ตาร์ทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก

1.5.3.4 ในกรณีของคอนกรีต เลือกใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซีเมนต์ประเภทที่ 3 และเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 แล้วทำการทดลองและทำนายพลังงานการผสมคอนกรีตทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก

โดยสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังนี้



1.5.4 การทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต โดยวัสดุผงที่ใช้ในการทดลองในกรณีของเพสต์จะแสดงดังตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 การจำแนกกลุ่มของวัสดุผงที่ใช้ในการทดลอง

กลุ่มของวัสดุผงที่ใช้	วัสดุผงที่ใช้ในการทดลอง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ซม.^{2}/กรัม)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ประเภทที่ 1
ซีเมนต์	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3476	-
	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3	5084	-
	ซีเมนต์ผสม	4056	-
เถ้าลอย	เถ้าลอยขนาดดั้งเดิม	2169	10, 20, 30, 40
	เถ้าลอยแยกละเอียดครั้งที่ 1	1733	20, 40
	เถ้าลอยแยกละเอียดครั้งที่ 2	3734	20, 40
ฝุ่นหินปูน	ฝุ่นหินปูนขนาดดั้งเดิม	3981	5, 10, 15, 20

โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

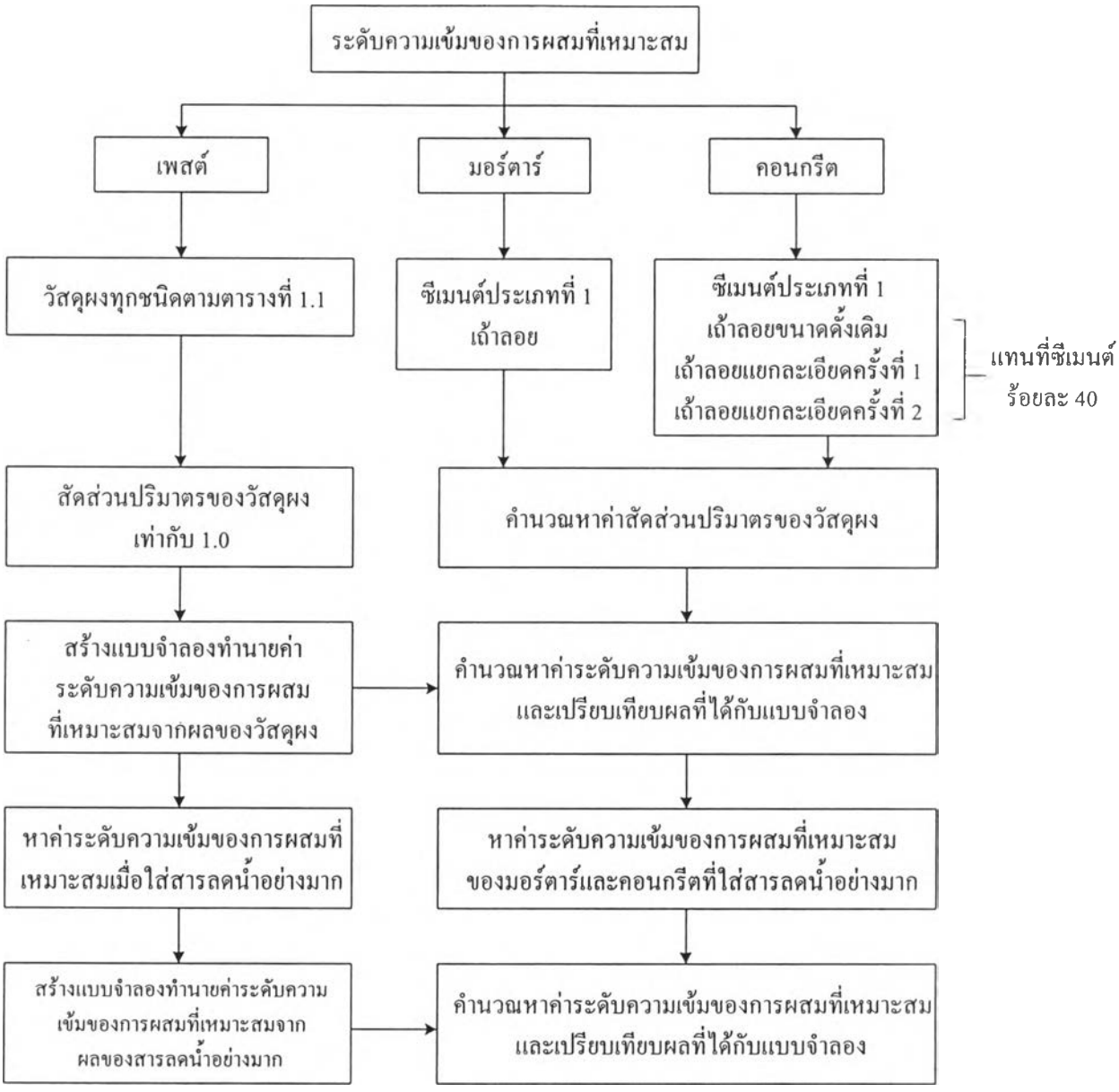
1.5.4.1 ทำการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงแต่ละชนิดทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก โดยค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้เพสต์มีค่าการไหลมากที่สุด ซึ่งทดสอบด้วยโต๊ะการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230

1.5.4.2 สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์ตามคุณสมบัติของวัสดุผงที่ใช้ทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก

1.5.4.3 ในกรณีของมอร์ตาร์ เลือกใช้วัสดุผงเพียงซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย ทำการทดลองและทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก โดยค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลมากที่สุด ซึ่งทดสอบด้วยโต๊ะการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230

1.5.4.4 ในกรณีของคอนกรีต เลือกใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย 3 ขนาดแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 แล้วทำการทดลองและทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก โดยค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้คอนกรีตมีระยะการยุบตัวมากที่สุด ซึ่งทดสอบด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM C143

โดยสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังนี้

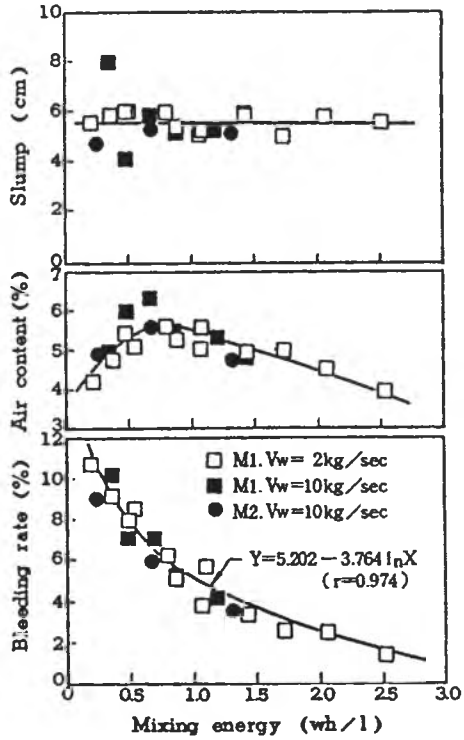


1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

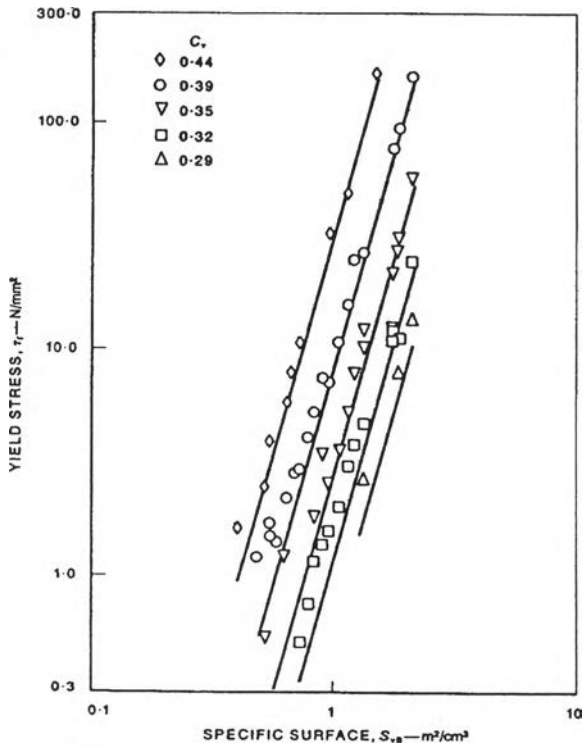
1.6.1 สามารถอธิบายผลของคุณสมบัติของวัสดุผงที่มีต่อพลังงานการผสมทั้งในกรณีของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต

1.6.2 สามารถอธิบายผลของสารลดน้ำอย่างมากที่มีต่อพลังงานการผสมของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ได้

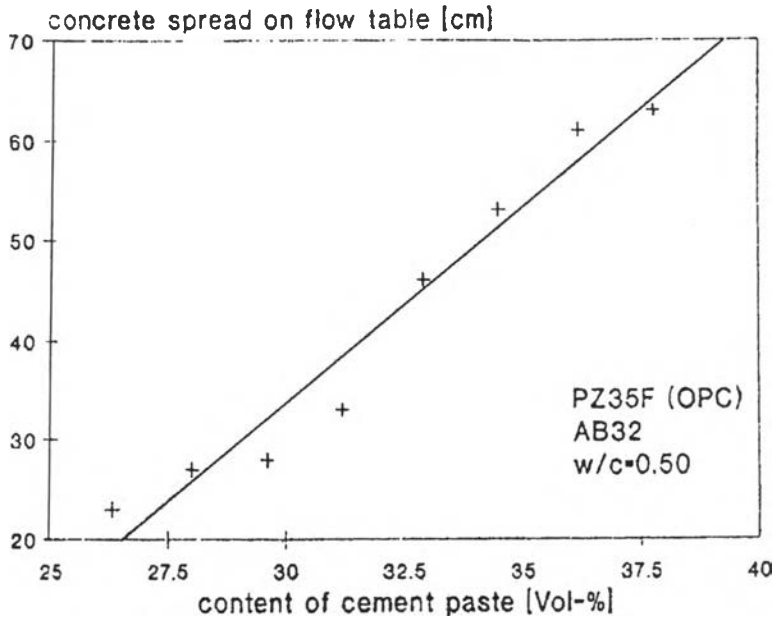
1.6.3 สามารถอธิบายผลของคุณสมบัติของวัสดุผงที่มีต่อระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมทั้งในส่วนของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากได้



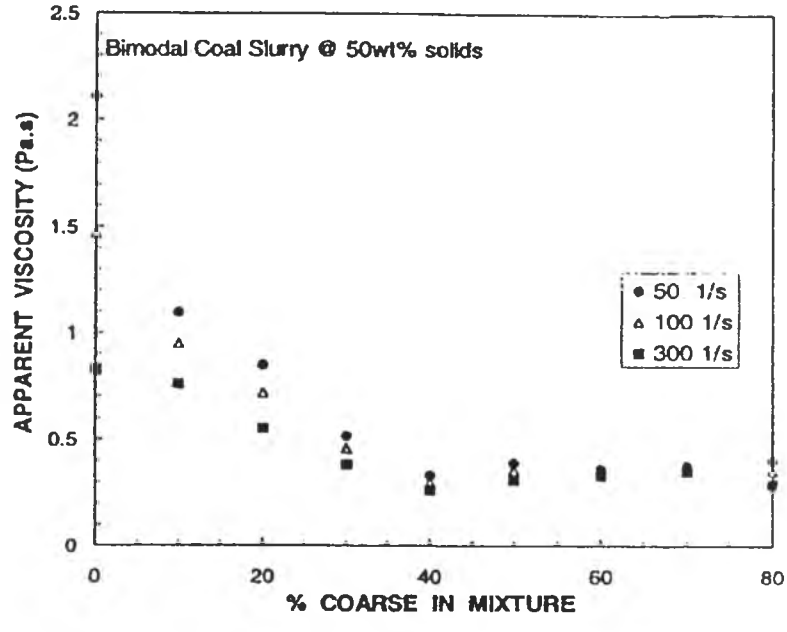
รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของคอนกรีตสดกับค่าระดับความเข้มของการผสม[2]



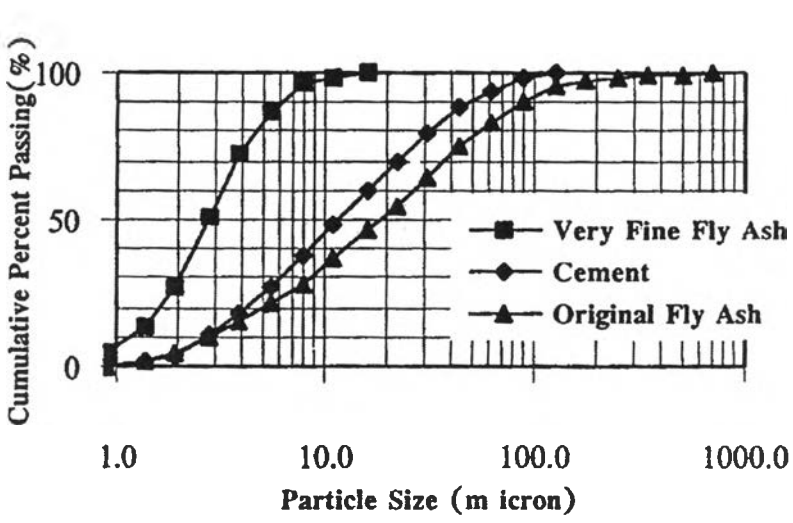
รูปที่ 1.2 ผลของพื้นที่ผิวจำเพาะต่อหน่วยแรงเฉือนคลากของซีเมนต์เพสต์[5]



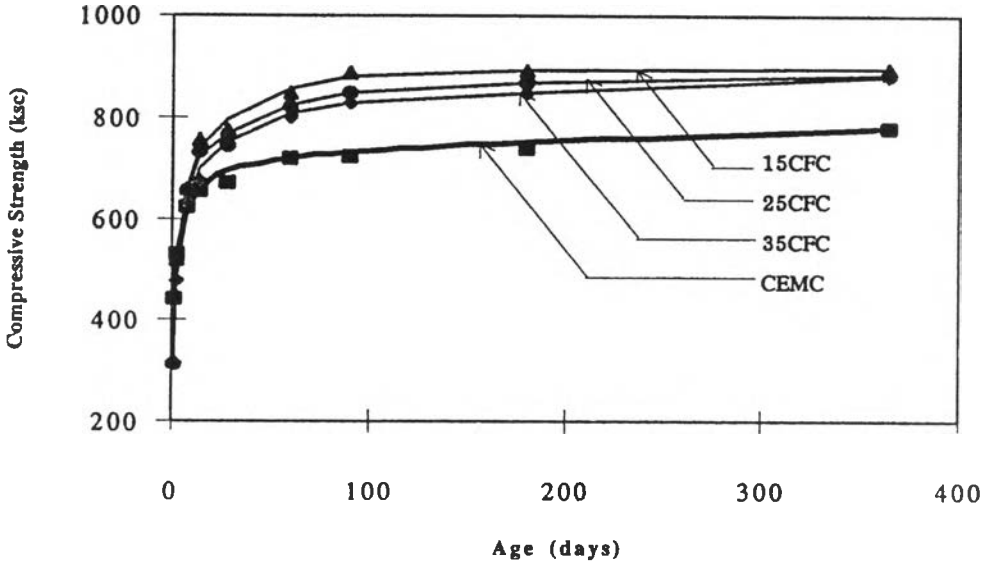
รูปที่ 1.3 ผลของปริมาณเพสต์ต่อค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต[6]



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับขนาดของวัสดุผงในส่วนผสม[7]

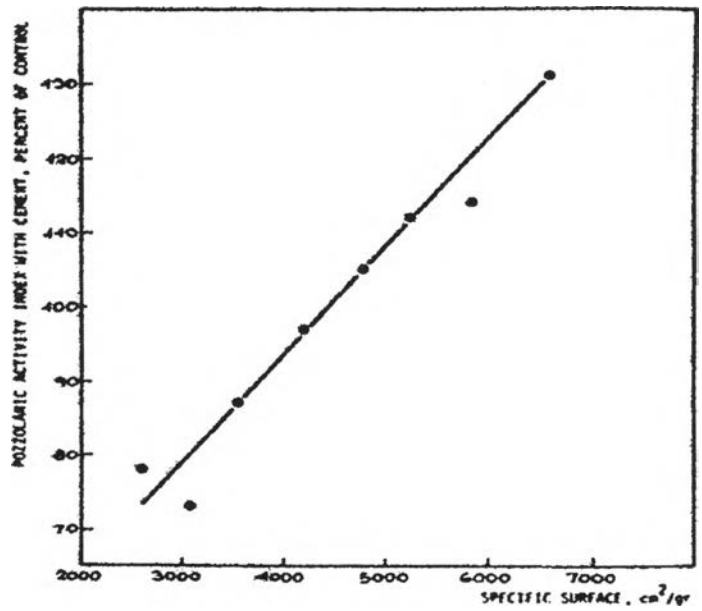


(ก) ขนาดคละของซีเมนต์ เถ้าลอยขนาดดั้งเดิมและเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง

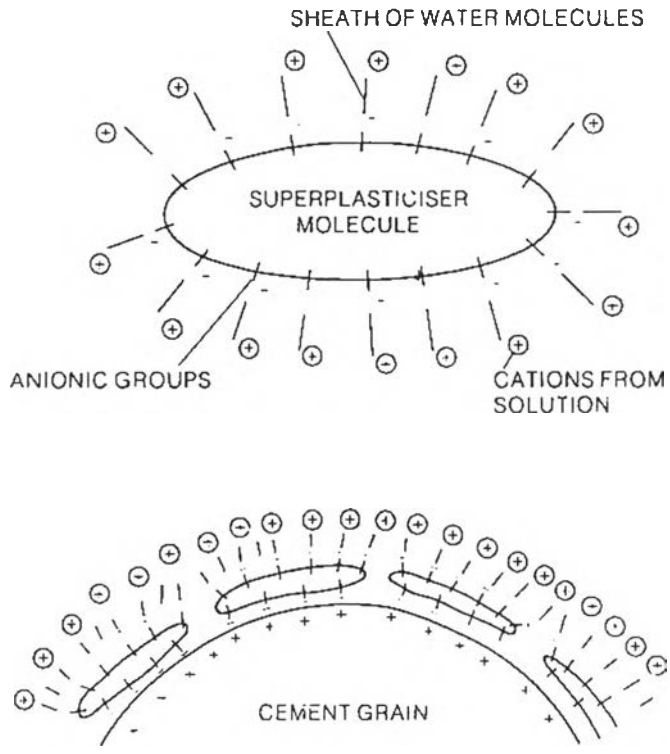


(ข) ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยความละเอียดสูงเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

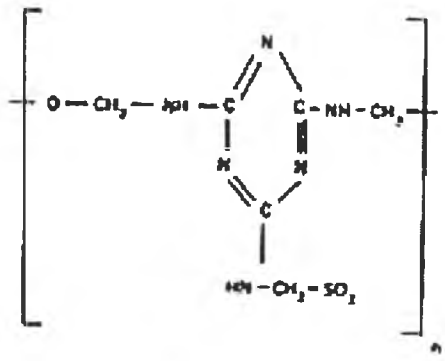
รูปที่ 1.5 ผลของเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต[19]



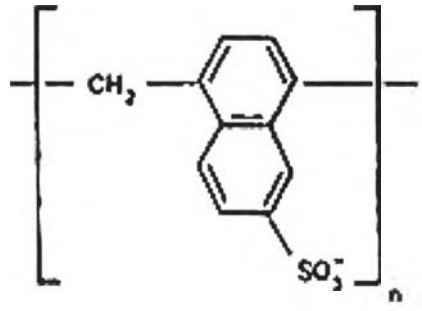
รูปที่ 1.6 ผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก[24]



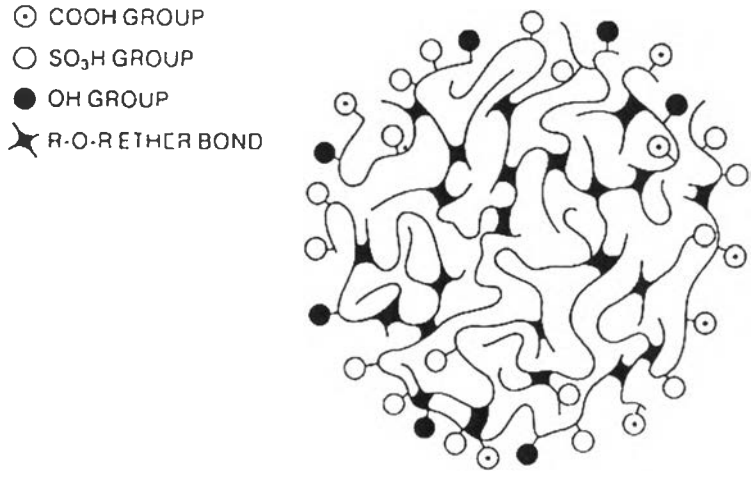
รูปที่ 1.7 โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างมากและลักษณะการดูดติดที่ผิวซีเมนต์[28]



(ก) โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมากชนิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท

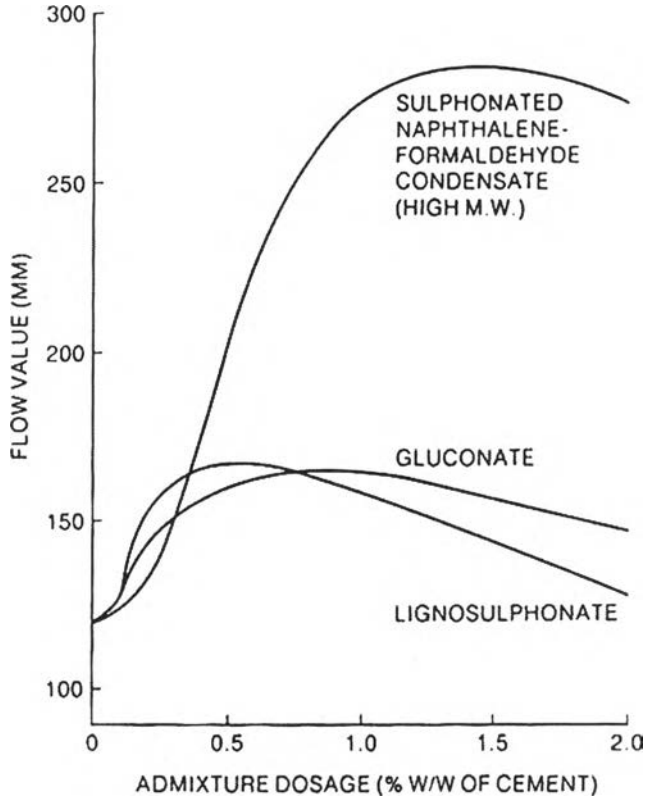


(ข) โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมากชนิดแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท

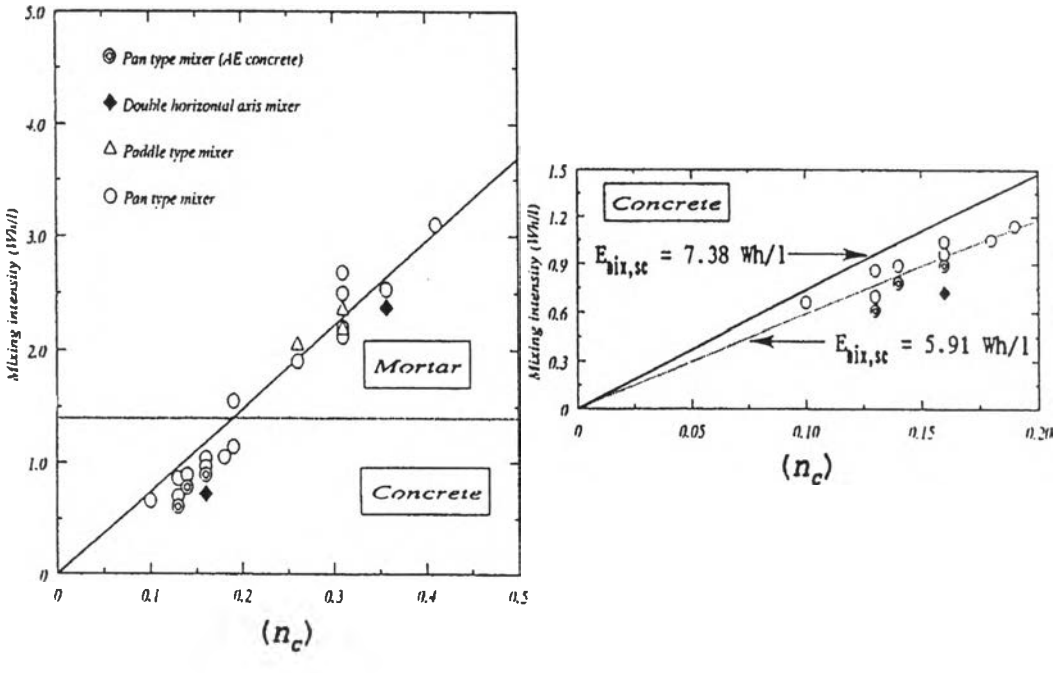


(ค) โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมากชนิดโมดิฟายลิกโนซัลโฟเนท

รูปที่ 1.8 โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมากประเภทต่าง ๆ [28]



รูปที่ 1.9 ค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์เมื่อใช้สารลดน้ำอย่างมากชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน[28]



รูปที่ 1.10 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในส่วนของคอนกรีตและมอร์ตาร์[35]