บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 ทั่วไป

วัสดุผงชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในงานคอนกรีตจะมีคุณสมบัติพื้นฐานที่แตกต่างกันออกไป เช่น ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด รูปร่างของอนุภาคเป็นต้น หรือแม้แต่วัสดุผงชนิดเดียวกันคุณสมบัติพื้นฐานเหล่านี้ก็อาจจะแตกต่างกันได้ตามกระบวนการผลิตหรือแหล่งที่มาของวัสดุผง การวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาถึงผลของคุณสมบัติของวัสดุผงโดยมุ่งเน้นไปที่ผลที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการผสมที่ใช้ค่าพลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเป็นดัชนีในการศึกษา นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลที่เกิดขึ้นต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่เกิดขึ้นทั้งในสภาวะสดและแข็งตัว โดยผลที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

จากผลการทดลองที่ใช้วัสดุผงแตกต่างกัน 6 ชนิดและเปลี่ยนแปลงขนาดในกรณีของเถ้าลอยอีก 3 ขนาด พบว่า รูปร่างของวัสดุผงส่งผลอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำที่เป็นสัดส่วนโดยปริมาตร โดยวัสดุผงที่มีรูปร่างกลม เช่น เถ้าลอย จะมีค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรที่ต่ำที่สุดเนื่องจากมีค่าสัดส่วนช่องว่างน้อยที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำนี้จะมีค่าสูงขึ้นตามรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุมมากขึ้นเนื่องจากมีสัดส่วนช่องว่างที่น้ำสามารถถูกกักเก็บได้มากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้จะสามารถสร้างแบบจำลองใหม่ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่ขึ้นกับรูปร่างของวัสดุผงได้ดังนี้

$$\beta_{p,vol}(shape) = 0.349\varepsilon(\psi + 1.644) \qquad \text{(อ้างอิงจากสมการที่(2.5))}$$

โดยที่

ε = สัดส่วนช่องว่างโดยปริมาตรของวัสดุผงที่ไม่ได้ทำการแยกขนาด

ψ = สัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผง

แต่สำหรับเถ้าลอยซึ่งมีน้ำหนักเบาเนื่องจากมีความพรุนภายในอนุภาค ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำจะเป็นผลจาก 2 ส่วนคือ ผลจากรูปร่างที่กลมและผลของความพรุนภายใน โดยผลของความพรุนภายในนี้จะขึ้นกับขนาดของเถ้าลอยที่ใช้ หากเถ้าลอยที่ใช้มีขนาดที่ใหญ่จะมีความพรุนอยู่มากกว่าเถ้าลอยขนาดที่เล็ก โดยสามารถวัดความพรุนได้จากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย ซึ่งเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีความพรุนสูงค่าความถ่วงจำเพาะจะมีค่าต่ำ จากผลการทดลองจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยที่เป็นผลจากความพรุนนี้มีค่าที่ต่ำสุดเท่ากับ 0.78% โดยปริมาตรของเถ้าลอย โดยแบบจำลองใหม่ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยที่ขึ้นกับความพรุนภายในที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เป็นดังนี้

$$\beta_{p,vol}(porosity) = 0.0078\exp(0.0802 d_{av}) \qquad \text{(อ้างอิงจากสมการที่ (2.6))}$$

เมื่อ

d_{av} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเถ้าลอย

ในกรณีของส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก พบว่า สารลดน้ำอย่างมากจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำมีค่าลดลงซึ่งขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารลดน้ำอย่างมากที่ใช้รวมไปถึงชนิดและรูปร่างของวัสดุผงที่ใช้ด้วย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์ที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและเถ้าลอยที่มีรูปร่างกลมจะพบว่าสารลดน้ำอย่างมากจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ได้มากกว่าเถ้าลอย

5.1.2 ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อพลังงานการผสม

พลังงานที่ใช้ในการผสมคือ พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการผสม จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากพันธะของน้ำในส่วนผสมและผลจากเครื่องผสมซึ่งประกอบด้วย รูปร่างของใบพาย ความเร็วรอบและลักษณะการหมุนของใบพาย ในการศึกษาพลังงานการผสมของเพสต์จะพบว่า พลังงานการผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำลงในส่วนผสมจากสภาวะแห้ง และจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณน้ำในสภาวะอิ่มตัวหรือปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผง หลังจากนั้นเมื่อใส่ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นอีกพลังงานการผสมจะมีค่าลดลงจนเท่ากับพลังงานการผสมในสภาวะแห้งเมื่อปริมาณน้ำที่ใส่เท่ากับปริมาณน้ำที่ทำให้อนุภาคอยู่ห่างกันเป็นระยะ 10% ของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคนี้จะขึ้นกับรูปร่างและความละเอียดของวัสดุผงด้วย หากเปรียบเทียบที่ปริมาณน้ำอิสระเท่ากันแล้ววัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมจะใช้พลังงานในการผสมที่สูงกว่ารูปร่างที่เป็นทรงกลมเนื่องจากผลของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและความหนืดแบบพลาสติกที่สูงกว่า สำหรับการผสมในกรณีของมอร์ตาร์ พบว่า พลังงานการผสมจะขึ้นกับสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงด้วยซึ่งจะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีคือที่สัดส่วนปริมาตรวัสดุผงต่ำกว่าและสูงกว่า 0.25 โดยในกรณีที่สัดส่วนปริมาตรวัสดุผงต่ำกว่า 0.25 การพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะพิจารณาทั้งวัสดุผงและทรายร่วมกัน และในกรณีที่สัดส่วนปริมาตรวัสดุผงมากกว่า 0.25 จะพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจากวัสดุผงเพียงอย่างเดียว สำหรับการผสมในกรณีของคอนกรีต จะต้องคำนึงถึงพลังงานการผสมในสภาวะแห้งด้วยเนื่องจากพลังงานการผสมในสภาวะแห้งจะมีค่าประมาณ 50% - 75% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด จากผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองของพลังงานการผสมที่ใช้ในกรณีของเพสต์สามารถนำมาใช้ในกรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีตได้เป็นอย่างดี

สำหรับส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก พบว่า สารลดน้ำอย่างมากจะช่วยลดพลังงานการผสมลงได้โดยจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่ใช้และปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค โดยขนาดของแรงผลักจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำสูงขึ้น สำหรับแบบจำลองที่ใช้ทำนายพลังงานการผสมของส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงต่าง ๆ และใส่สารลดน้ำอย่างมาก พบว่าแบบจำลองที่เสนอโดยนิพนธ์[36] ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงจึงสามารถนำมาใช้ได้ในกรณีที่เปลี่ยนวัสดุผงเป็นประเภทต่าง ๆ

5.1.3 ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

ค่าระดับความเข้มของการผสม คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ไปโดยเครื่องผสม และค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้ส่วนผสมมีค่าการไหลหรือระยะการยุบตัวมากที่สุดซึ่งเป็นสภาวะที่ส่วนผสมเกิดการกระจายตัวอย่างเหมาะสม จากการศึกษาพบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์ไม่ขึ้นกับความละเอียดของวัสดุผงแต่จะขึ้นกับรูปร่างของวัสดุผงเป็นหลัก ซึ่งสามารถสรุปแยกตามกลุ่มรูปร่างของวัสดุผงได้ดังนี้

สำหรับวัสดุผงในกลุ่มที่มีรูปร่างทรงกลม เช่น เถ้าลอย จะมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมต่ำที่สุดคือเท่ากับ 2.10 Wh/l เนื่องจากมีปริมาณสัดส่วนช่องว่างที่น้อยจึงต้องการพลังงานที่ใช้ในการกระจายตัวต่ำ นั่นคือ วัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมจะมีคุณสมบัติในการกระจายตัวที่ดี

สำหรับวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมจะมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมสูงขึ้น โดยในกรณีของซีเมนต์ประเภทที่ 1 จะมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเท่ากับ 7.04 Wh/l ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจากผลของรูปร่างของวัสดุผงได้ดังนี้

$$E_{im,sp} = \alpha_{sh} E_{in,sphere} \qquad \text{(อ้างอิงสมการที่ (4.7))}$$

เมื่อ

$$\alpha_{sh} = 2.44\,\psi - 1.44 \qquad \text{(อ้างอิงสมการที่ (4.8))}$$

โดยที่

$E_{im,sp}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงใด ๆ

α_{ih} = ค่าตัวประกอบที่เพิ่มขึ้นของระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเนื่องจากผลของรูปร่างของวัสดุผง

ψ = สัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผง

$E_{in,sphere}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างกลมซึ่งจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.10 Wh/l

สำหรับค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีต จากผลการทดลองพบว่า จะขึ้นกับค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์และค่าสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผง โดยสามารถสร้างแบบจำลองได้ดังนี้

แบบจำลองในกรณีของมอร์ตาร์

$$E_{in} = n_p E_{im,sp} = n_p \left(\alpha_{sh} E_{in,sphere}\right) \qquad \text{(อ้างอิงสมการที่ (4.9))}$$

เมื่อ

E_{in} = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสม

n_p = สัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดในส่วนผสม

$E_{im,sp}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์สำหรับวัสดุผงรูปร่างใด ๆ

แบบจำลองในกรณีของคอนกรีต

$$E_{in} = 0.8 n_p E_{in\,sp} = 0.8 n_p \left(\alpha_{sh} E_{in\,sphere} \right) \qquad \text{(อ้างอิงสมการที่ (4.10))}$$

สำหรับผลของระดับความเข้มของการผสมต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตมีแนวโน้มที่จะมีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นตามค่าระดับความเข้มของการผสม ซึ่งเป็นเพราะพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของอนุภาคซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมากขึ้น

สำหรับส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก พบว่า สารลดน้ำอย่างมากจะช่วยลดค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลงได้ เนื่องจากสารลดน้ำอย่างมากจะลดจำนวนรอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค ซึ่งการลดลงนี้จะขึ้นกับรูปร่างของวัสดุผงที่ใช้ ปริมาณน้ำในส่วนผสมและปริมาณการใส่สารลดน้ำอย่างมาก โดยแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากสามารถนำแบบจำลองเดิมของนิพนธ์[36] ซึ่งศึกษาเพียงการใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 มาปรับปรุงโดยเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมตามวัสดุผงที่ใช้ อย่างไรก็ตาม การใส่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่มากเกินปริมาณที่เพียงพอที่จะดูดติดที่อนุภาคของวัสดุผงจะไม่ทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าลดลงอีก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของการผสมได้และสามารถใช้เป็นดัชนีในการควบคุมกระบวนการผสมแทนระยะเวลาในการผสมได้ ค่าระดับความเข้มของการผสมจะส่งผลอย่างมากต่อระยะการยุบตัวของคอนกรีตสด สำหรับคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ในส่วนผสมหนึ่ง ๆ การผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมสามารถทำให้ค่าระยะการยุบตัวสูงสุดมีค่ามากกว่าระยะการยุบตัวที่ระดับความเข้มของการผสมต่ำ ๆ ได้ถึง 2 – 3 เท่า นั่นคือ สามารถลดปริมาณในส่วนผสมลงได้หากทำการผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้การเยิ้มมีค่าลดลง สำหรับผลทางด้านกำลังอัดนั้น สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบส่วนผสมเพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดใด ๆ จะสามารถลดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมลงได้ หากทำการผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่สูงเพียงพอ

หากพิจารณาในด้านระยะเวลาที่เหมาะสมในการผสม การผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมีแนวโน้มที่จะใช้เวลาในการผสมที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 30 วินาทีถึง 1 นาที ซึ่งขึ้นกับสัดส่วนผสมที่ใช้ แต่หากใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้กำลังอัดในระยะเริ่มต้นมีค่าต่ำแม้ว่าจะทำการผสมเป็นอย่างดี การผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฝุ่นหินปูนจะใช้ระยะเวลาที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์ สำหรับการผสมคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากนั้น มีข้อควรระวังในการผสมเป็นกรณีพิเศษ คือ ไม่ควรทำการผสมนานกว่าการผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมากนัก เนื่องจากระยะการยุบตัวของคอนกรีตจะต่ำลงอย่างมากจนอาจไม่มีค่าการยุบตัวได้ ซึ่งทำให้ผิดวัตถุประสงค์ในการใช้สารลดน้ำอย่างมากที่ต้องการให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวที่สูง

อย่างไรก็ตาม ในงานคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดของมวลรวมหยาบที่ใหญ่ขึ้นอาจส่งผลช่วยในการกระจายอนุภาคของวัสดุผงได้ดีขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยนี้เพิ่มเติม นอกจากการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผสมแล้ว ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงที่มีต่อความหนืดแบบพลาสติกของเพสต์ก็เป็นหัวข้อที่ควรทำการศึกษาวิจัยในขั้นต่อไปเช่นกัน เนื่องจากความหนืดแบบพลาสติกที่เปลี่ยนไปจะทำให้การเคลื่อนที่ของวัสดุผสมแตกต่างกันด้วย สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับผลของสารลดน้ำอย่างมาก เนื่องจากสารลดน้ำอย่างมากแต่ละประเภทจะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตแตกต่างกัน จึงควรทำการวิจัยเพิ่มเติมถึงผลของชนิดของสารลดน้ำอย่างมากต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีตด้วยเช่นกัน